

INFLUÊNCIA DA INTERFACE DA CINÉTICA DE EMBEBIÇÃO E SECAGEM DE PAREDES COM MÚLTIPLAS CAMADAS

MARIANA LOPES DA CUNHA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos
Guimarães Teixeira

Coorientador: Doutor João Delgado

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais.

“O sucesso é a consequência.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho gostaria de manifestar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que ao longo destes meses contribuíram para a sua concretização. Não podendo deixar de destacar alguns dos fundamentais intervenientes.

Primeiramente queria agradecer à professora Ana Sofia Guimarães pela sua orientação, disponibilidade, colaboração e interesse ao longo destes meses de trabalho.

Ao professor João Delgado pela sua co-orientação, acompanhamento e disponibilidade prestadas.

Ao professor Vasco Freitas pelas suas sugestões e correcções concretizadas.

A todos os intervenientes no laboratório de construções civis pela colaboração e companheirismo dispensado durante a realização da campanha experimental.

Aos amigos e à família, que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis e de maior tensão, dando-me carinho e ajuda, tornando esta batalha possível e conquistável.

RESUMO

A humidade é um dos principais causadores da destruição e degradação do património edificado alterando as características e funcionalidade dos materiais de construção.

A humidade ascensional é um dos tipos de humidade mais frequente e de maior complexidade, em que a humidade solo ascende nas paredes e pavimentos dos edifícios através da estrutura porosa dos materiais de construção.

Os edifícios são construídos por camadas de diferentes materiais, com diferentes propriedades hídricas. As alvenarias são o elemento construtivo mais comum na construção, sendo estas um grande exemplo de paredes compostas por diferentes camadas. Estas paredes estão expostas à chuva, condensações, humidade ascensional, entre outras causas naturais que provocam a sua degradação ao longo do tempo.

No presente trabalho foram estudados os principais mecanismos de transporte de humidade nos materiais de construção, e foi analisado experimentalmente a influência da interface na cinética de embebição e secagem de paredes com múltiplas camadas recorrendo a ensaios de absorção de água por capilaridade e de secagem. Os provetes ensaiados foram construídos no Laboratório de Física das Construções, com duas camadas de tijolo maciço unidas por uma junta de argamassa.

Palavras-Chave: Interface, humidade ascensional, capilaridade, paredes, juntas.

ABSTRACT

Moisture is a major cause of the destruction and degradation of the built heritage by changing the characteristics and functionality of the building materials.

The rising damp is one of the most common types of moisture and higher complexity, in which the soil moisture rises in the walls and floors of buildings by means of porous building materials.

The buildings are constructed of layers of different materials with different hydraulic properties. The walls are the most common building element in the building, and a great example of these walls composed of different layers. These walls are exposed to rain, condensation, rising damp, among other natural causes that lead to its degradation over time.

In the present work we have studied the main transport mechanisms of moisture in building materials and was experimentally examined the influence of the interface on the kinetics of absorption and drying of walls multilayer assays using capillary water absorption and drying. The specimens tested were built at the Laboratory of Building Physics, with two layers joined by a solid brick mortar joint.

KEYWORDS: Interface, rising damp, capillary, walls, together.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	1
RESUMO	3
ABSTRACT.....	4
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ÂMBITO E OBJECTIVO DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	2
2 HUMIDADE NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	6
2.3. TRANSPORTE EM FASE LÍQUIDA	10
2.4. TRANSPORTE EM FASE VAPOR.....	12
2.5. SECAGEM.....	14
2.6. FORMAS DE MANIFESTAÇÃO DA HUMIDADE.....	15
2.7. FACTORES CONDICIONANTES NA HUMIDADE ASCENSIONAL	17
2.8. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE HUMIDADE ASCENSIONAL	19
3 O FENÓMENO DA INTERFACE	25
3.1. INTRODUÇÃO	25
3.2. TIPOS DE INTERFACE	27
3.3. INFLUÊNCIA DA INTERFACE NA HUMIDADE ASCENSIONAL	28
3.3.1. INTRODUÇÃO	28
3.3.2. RESULTADOS EXPECTÁVEIS NA CAMPANHA EXPERIMENTAL	31
3.3.3. RESULTADOS.....	33
3.4. INFLUÊNCIA DA INTERFACE NA SECAGEM	34

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA INTERFACE NA ABSORÇÃO DE ÁGUA E SECAGEM DE PAREDES SUJEITAS À HUMIDADE ASCENSIONAL	37
4.1. INTRODUÇÃO	37
4.2. ENSAIO DE CAPILARIDADE	38
4.2.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	38
4.2.2. CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	40
4.2.3. PROCEDIMENTO	44
4.2.4. RESULTADOS OBTIDOS	46
4.2.5. DIFICULDADES	62
4.2.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	65
4.3. ENSAIO DE SECAGEM	68
4.3.1. INTRODUÇÃO	68
4.3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	71
4.3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	72
4.3.4. RESULTADOS OBTIDOS	73
4.3.5. DIFICULDADES	82
4.3.6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	82
5 CONCLUSÃO	85
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	86
6 BIBLIOGRAFIA	87
7 ANEXOS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - distribuição dos 70 000 sinistros declarados em 96/97 [2].....	5
Figura 2 - Porosidade aberta.....	6
Figura 3 - Porosidade fechada	6
Figura 4 - Descrição convencional dos teores de humidade de referência de um material poroso.	8
Figura 5 - Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa [9].....	9
Figura 6 - ocorrência de condensações internas [4]	10
Figura 7 - Fenómeno da capilaridade	10
Figura 8- Diagrama psicrométrico [4].	14
Figura 9 - vários tipos de ascensão da água. A e B - Águas subterrâneas C- Águas superficiais	16
Figura 10 - Variação do teor de humidade ao longo da secção transversal [15]	18
Figura 11 - influência da colocação de material impermeável na humidade ascensional.	19
Figura 12 - Barreiras físicas [4]	20
Figura 13 - Barreiras químicas [4].....	21
Figura 14 - Redução da secção absorvente [4].	21
Figura 15 - tubos de arejamento [4]	22
Figura 16 - sistemas electro osmóticos [4].....	22
Figura 17 - ocultação das anomalias [4].	23
Figura 18 - Ventilação da base das paredes [4].	23
Figura 19 - Transporte de água pelas juntas	25
Figura 20 - Tipos de interface	27
Figura 21 - Princípio de cálculo da relação $R(P_c)$ [8].	28
Figura 22 - princípio de calculo da relação $s(\varphi)$ [8].	29
Figura 23 – Absorção de um provete constituído por dois materiais em que o primeiro tem um maior coeficiente de absorção que o segundo ($S_A > S_B$) [23]	30
Figura 24 - Gráfico esperado para comportamento da absorção no provete monolítico	31
Figura 25 – Atraso na embebição de um provete com duas camadas de barro vermelho [8].	31
Figura 26 - Atraso na cinética de molhagem devido à interface em função da sua posição, com a camada 1 com um coeficiente de absorção maior que a camada 2 [20].	32
Figura 27 - Gráficos esperados caso a água não ultrapasse a junta	32
Figura 28 - Gráficos esperados caso a água ultrapasse a junta	33
Figura 29 - Curvas características de secagem de diferentes materiais [8].	34
Figura 30 - Componente A e componente B.....	39

Figura 31 - Materiais utilizados.....	40
Figura 32 - Construção dos provetes	41
Figura 33 – Provetes construídos e molde utilizado	41
Figura 34 - Provetes construídos	42
Figura 35 – impermeabilização dos provetes.....	43
Figura 36 - Provetes a secar na estufa.	43
Figura 37 - Suporte feito em pionés	45
Figura 38 - Ensaios a decorrer	45
Figura 39 - Determinação do coeficiente de absorção.....	46
Figura 40 - fotografias do provete quando já estava estabilizado.....	62
Figura 41 - Provetes em que argamassa não aderiu ao tijolo	63
Figura 42 - molde de papelão usado.....	63
Figura 43 - fases do processo de secagem	68
Figura 44 - Curva típica de secagem em materiais porosos [5].....	69
Figura 45- Folhas de polietileno	72
Figura 46 - Provete selado inferiormente	72
Figura 47 - Provetes em processo de secagem.....	73
Figura 48 - Provete C' no processo de secagem.	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Porosidade de revestimentos da fachada [2]	6
Tabela 2 - Variação do teor de humidade com a humidade relativa do barro vermelho e betão celular [8].....	7
Tabela 3- revestimentos de fachada - avanços da frente húmida e velocidade de absorção [2].....	12
Tabela 4 - Tipos de humidade.....	16
Tabela 5 - resumo das técnicas de tratamento da humidade ascensional [4].....	24
Tabela 6 - Características das argamassas.....	40
Tabela 7 - Caracterização dos provetes de ensaio.....	42
Tabela 8- Massa dos provetes ao longo do ensaio.	44
Tabela 9 - Resultados dos ensaios	65
Tabela 10 - Comparação com resultados de outros autores	66
Tabela 11 - Sucção do tijolo [19].....	66
Tabela 12 - Porosidade aberta do barro Vermelho (Vol%) [8].....	67
Tabela 13 - Classificação do CSTB para revestimentos da fachada [2].....	67
Tabela 14 - classificação dos provetes segundo Holm.....	68
Tabela 15 - valores para coeficiente β [11]	70
Tabela 16- coeficientes característicos do material da parede [25].....	70
Tabela 17 – Resultados do ensaio de secagem	82
Tabela 18 - Velocidades médias de secagem observadas no CSTB, em Nantes, para diferentes classes de H.R. e velocidades do vento.	83

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete A e provete A'	47
Gráfico 2 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade do provete A e do provete A'	47
Gráfico 3 - Variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete B e do provete C (argamassa 1 e espessura 1cm).	48
Gráfico 4 - Variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete D e do provete E (argamassa 1 e espessura 2cm).	49
Gráfico 5 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete G e F (argamassa 2, e espessura 1cm).	49
Gráfico 6 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete H e I (argamassa 2, e espessura 2cm).	50
Gráfico 7 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes B e C..	50
Gráfico 8 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes D e E..	51
Gráfico 9 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes G e F..	51
Gráfico 10 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes H e I.	52
Gráfico 11 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete C e D (argamassa 1, e altura da base de 11cm).	52
Gráfico 12 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete H e F (argamassa 2, e altura da base de 11cm).	53
Gráfico 13 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete B e E (argamassa 2, e altura da base de 11cm).	53
Gráfico 14 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete G e I (argamassa 2, e altura da base de 11cm).	54
Gráfico 15 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes C e D.	55
Gráfico 16 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes F e H.	55
Gráfico 17 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes B e E.	56
Gráfico 18 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes G e F.	56
Gráfico 19 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete G e B (argamassa 2, argamassa 1).	57
Gráfico 20 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete C e F (argamassa 1, argamassa 2).	57
Gráfico 21 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete D e H (argamassa 2, argamassa 1).	58

Gráfico 22 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete E e I (argamassa 1, argamassa 2).	58
Gráfico 23 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes G e B	59
Gráfico 24 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes C e F	60
Gráfico 25 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes D e H	60
Gráfico 26 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes E e I.	61
Gráfico 27 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete C e C' (com impermeabilizante, sem impermeabilizante).	61
Gráfico 28 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete A.....	64
Gráfico 29 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete B.....	64
Gráfico 30 - Curva de evaporação do provete A'.....	73
Gráfico 31 – Curva de evaporação do provete A e A'.....	74
Gráfico 32 - Curva de evaporação do provete B e C.....	75
Gráfico 33 - Curva de evaporação do provete E e D.....	75
Gráfico 34 - Curva de evaporação do provete G e F.....	76
Gráfico 35 - Curva de evaporação do provete I e H.....	76
Gráfico 36 - Curva de evaporação do provete C e D.....	77
Gráfico 37 - Curva de evaporação do provete H e F.....	77
Gráfico 38 - Curva de evaporação do provete E e B.....	78
Gráfico 39 - Curva de evaporação do provete I e G.....	78
Gráfico 40 - Curva de evaporação do provete B e G.....	79
Gráfico 41 - Curva de evaporação do provete C e F.....	79
Gráfico 42 - Curva de evaporação do provete H e D.....	80
Gráfico 43 - Curva de evaporação do provete E e I.....	80
Gráfico 44 - Curva de evaporação do provete E e I.....	81

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

LFC – Laboratório de Física das Construções

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HR – Humidade relativa [%]

W – teor de humidade [kg/kg]

Wh - teor de humidade higroscópica [kg/kg]

Wmax - Teor de humidade de máxima [kg/kg]

Wcr - teor de humidade crítica [kg/kg]

Wsat – teor de humidade de saturação [kg/kg]

C- coeficiente de capilaridade [$\text{kg/m}^2\sqrt{\text{s}}$]

A - coeficiente de absorção de água [$\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$]

t - tempo [s]

Dmax – diâmetro máximo [mm]

S- coeficiente característico do material

β - Coeficiente de transferência superficial de humidade [m/s]

β_i – Coeficiente de transferência superficial de humidade interior [m/s]

β_e - Coeficiente de transferência superficial de humidade exterior [m/s]

Pa- pressão do ar [Pa]

Págua- pressão da água [Pa]

Pc - pressão capilar [Pa]

V- velocidade [m/s]

U – humidade relativa do ar [%]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Evitar a deterioração dos edifícios históricos é cada vez mais uma preocupação do ser humano. A humidade é um dos principais causadores da destruição e degradação do património edificado alterando as características e funcionalidade dos materiais de construção. Além disso, elevados teores de humidade dentro de uma habitação podem provocar problemas de saúde nomeadamente problemas respiratórios. É então importante reduzir ou eliminar a humidade nos edifícios. Para tal é necessário conhecer e compreender as reacções dos materiais de construção quando sujeitos à movimentação e fixação da água no seu interior.

Apesar de ser objecto de investigação desde há muitos anos, e de se conhecer diversos trabalhos na área, as soluções para combater as patologias associadas à humidade têm limitações e nem sempre são eficazes. Essas ineficazes soluções por vezes devem-se ao facto de não se tratar da humidade como um problema real, com todas as complexidades e características específicas que a acompanham.

Dos vários tipos de humidade destaca-se a humidade ascensional onde a existência de programas de cálculo automático para simulação utilizados são 2D. No entanto o fenómeno da humidade ascensional é na realidade um problema 3D, com várias interfaces entre os materiais que devido à sua complexidade os estudos ainda são muito escassos.

O comportamento de um elemento construtivo depende das condições da envolvente e das propriedades dos seus constituintes que nem sempre são de fácil determinação. É comum, por simplificação, considerar-se que os elementos construtivos são constituídos por camadas independentes (sem ligações internas).

As alvenarias correntes em edifícios antigos, tanto em Portugal como no resto da Europa, apresentam com frequência problemas associados à humidade, podendo ter origem na ascensão capilar, na penetração por fendas, nos fenómenos de higroscopicidade, entre outros.

Uma parede de alvenaria é, na realidade uma parede constituída por multicamadas e não uma parede monolítica como é muitas vezes considerada para a simplificação dos estudos e análises dos modelos matemáticos. Em que, essas multicamadas são ligadas entre si, criando entre elas conexões que não podem ser desprezadas.

Perceber o comportamento dos materiais e características face à humidade são aspectos analisados ao longo deste trabalho. Neste sentido, foi proposto um estudo experimental para avaliar o desempenho e a influência das juntas nos fenómenos de troca de vapor e humidade entre os materiais, o ambiente e solo.

Espera-se com este estudo perceber o tipo de materiais que se devem utilizar e como é que estes devem ser empregues num elemento construtivo para impedir e/ou atenuar a ascensão da água, tornando-se numa possível ajuda na reabilitação de edifícios antigos e na modelação de novas soluções aumentando o conforto e durabilidade das edificações.

O estudo experimental foi realizado no Laboratório de Física das Construções (LFC) da faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Foram realizados ensaios em provetes de tijolo maciço com diferentes juntas e analisando os seus comportamentos no fenómeno da absorção de água por capilaridade e secagem.

1.2. ÂMBITO E OBJECTIVO DO TRABALHO

Para prevenir a ocorrência de qualquer tipo de humidade é fundamental conhecer todas as propriedades dos materiais constituintes das paredes, nomeadamente a porosidade, a espessura e o teor em água e ainda a existência de sistemas de aquecimento e de ventilação no edifício. Todas estas variáveis referidas contribuem para uma maior ou menor altura de água atingida pela humidade ascensional, um do tipo de humidade mais frequente, nas edificações.

Para estudar o fenómeno da humidade ascensional, o seu tratamento e controlo, foi analisado o comportamento de provetes de tijolo maciço com e sem juntas de argamassa quando colocados em contacto com a água. O principal objectivo foi perceber qual a influência das juntas no fenómeno de embebição e de secagem num elemento construtivo.

Foram realizados ensaios experimentais em provetes de múltiplas camadas e confrontados os resultados para perceber qual a relação entre a espessura e altura das juntas e o coeficiente de absorção da argamassa das juntas com o coeficiente de capilaridade dos provetes e a altura atingida pela frente húmida.

Melhorar a qualidade das construções e prolongar a sua vida útil são deveres dos Engenheiros Civis muitas vezes dificultados pela presença da humidade. Espera-se com este trabalho aprofundar o conhecimento sobre o comportamento das paredes face à humidade ascensional e dar uma possível contribuição para uma nova forma de tratamento, uma vez que ainda não existe nenhuma solução completamente eficaz.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está dividido em 4 grandes partes:

- A primeira parte (Capítulo 2), de carácter fundamentalmente teórico, onde se descrevem as principais características dos materiais usados na construção, bem como os principais mecanismos de transferência de humidade, os tipos de manifestação de humidade, os factores que condicionam a humidade ascensional e ainda as técnicas de tratamento mais comuns.
- A segunda parte (Capítulo 3), onde se descreve o fenómeno de interface e os seus diferentes tipos entre camadas, bem como a sua influência no fenómeno de embebição e secagem do teor de água nos elementos construtivos.
- A terceira parte (Capítulo 4), de carácter experimental, onde se apresenta todo o estudo experimental realizado com o objectivo de analisar a influência da interface no transporte de humidade, nomeadamente o fenómeno da absorção de água por capilaridade e o fenómeno de secagem, os materiais e equipamentos adoptados e o procedimento do ensaio. Este capítulo termina com uma análise crítica dos resultados obtidos e respectivas conclusões.

- A quarta e última parte (Capítulo 5) onde se analisam os resultados obtidos nos ensaios experimentais e a informação recolhida. Apresenta-se ainda uma síntese das conclusões finais e possíveis trabalhos futuros a desenvolver neste âmbito.

2

HUMIDADE NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

A humidade e o homem têm travado uma luta desde a criação das primeiras edificações. Ao longo do tempo o homem foi desenvolvendo técnicas e melhorando as condições dos edifícios, no entanto a humidade ainda é efectivamente um dos grandes fatores de deteriorização dos materiais de construção e a consequente degradação dos edifícios [1].

Na figura 1 apresenta-se um estudo realizado em 1996/1997 a 70 000 sinistros declarados em França, onde é possível constatar que grande parte dos problemas nas edificações são a estanquidade da água. A estes problemas são acarretados grandes custos de reparação, como nos indica o mesmo estudo [2].



Figura 1 - distribuição dos 70 000 sinistros declarados em 96/97 [2]

Com a crescente importância atribuída à conservação do património, o estudo da transferência de humidade em materiais de construção tem sido objecto de importante investigação. Os primeiros estudos a ter em conta a transferência de humidade (na fase líquida e fase vapor) e de calor nas paredes dos edifícios, foram da autoria de Luikov e Philip-De Vries. Nos últimos anos têm sido desenvolvidos em Portugal também grandes estudos nesta área, designadamente Vasco Peixoto de Freitas, M.I.M. Torres e Ana Sofia Guimarães, orientadora deste projecto, especialmente no que diz respeito à Humidade Ascensional em paredes de edifícios.

2.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS

A transferência de humidade nos materiais de construção pode ocorrer na fase vapor e na fase líquida. Na fase vapor é condicionada pela difusão e por movimentos convectivos, na fase líquida é condicionada pela capilaridade, pela gravidade e o efeito do gradiente de pressão. Estes transportes de humidade podem ocorrer em simultâneo, dependendo das características dos materiais, da temperatura, da humidade relativa, da precipitação, da radiação solar, da pressão do vento e da presença de sais [3].

A porosidade dos materiais depende das características dos poros: tamanho, forma e grau de ligação. No que diz respeito ao grau de ligação dos poros os materiais podem ser classificados como materiais de porosidade aberta (figura 2) ou materiais com porosidade fechada (figura 3). Num material com porosidade aberta, situação mais corrente, os vazios comunicam entre si, permitindo a circulação e fixação de fluidos na sua estrutura. Um material com porosidade fechada, é um material impermeável, ou seja os vazios não comunicam entre si.



Figura 2 - Porosidade aberta

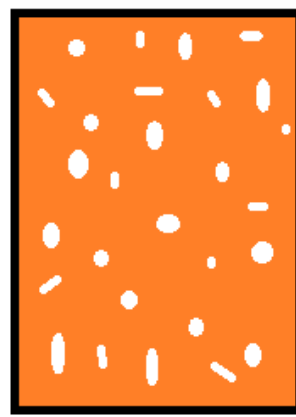


Figura 3 - Porosidade fechada

Relativamente ao tamanho dos poros e a sua influência no transporte de humidade, os poros podem ser classificados como: microporos, mesoporos e macroporos [4,5].

- Microporos – são os poros mais pequenos (inferiores a $0,002\mu$), nos quais a água não se consegue movimentar devido a elevadas forças capilares.
- Mesoporos (ou poros capilares) – são os poros com tamanho intermédio (entre $0,002$ e $0,05\mu$), e nos quais se efectua a percolação de água líquida.
- Macroporos - são os poros de maior dimensão (superiores a $0,05\mu$) e os responsáveis pelo transporte de vapor de água.

Na tabela 1, apresenta-se a porosidade de alguns materiais de construção bem como a dimensão média dos seus poros.

Tabela 1 - Porosidade de revestimentos da fachada [2]

Material	Porosidade [%]	Dimensão média dos poros [μ m]
Calcário (Moleanos)	6,78	0,1159
Calcário (Moca)	13,17	0,2978
Granito	4,10	0,0956
Tijolo	28,80	0,0782

A circulação e a fixação da água nos materiais de construção porosos podem ser explicadas por três mecanismos físicos: higroscopicidade, condensação e capilaridade [4]. Estes três mecanismos não são dissociáveis, podendo ainda juntar-se a eles a ação da gravidade e das pressões exteriores [6].

A **higroscopicidade** de um material consiste na capacidade que este tem em absorver água até estabelecer o equilíbrio com o meio no qual está inserido, ou seja, traduz-se na aptidão que os materiais têm em fixar moléculas de água por adsorção e as de devolver ao ambiente inserido [3,7]. Os materiais de construção podem ser divididos em dois grupos [3]:

- Materiais higroscópicos – quando se tratam de materiais em que é muito importante ter em consideração a quantidade de água fixada por adsorção, como é o caso da madeira e do betão celular.
- Materiais não higroscópicos - quando se tratam de materiais que mantêm a massa praticamente constante em qualquer ambiência a que estejam, como é o caso do barro vermelho.

Os materiais utilizados na construção podem ser praticamente todos considerados como materiais higroscópicos. Quando colocados num ambiente com variações de humidade relativa, o seu teor de humidade também sofre variações, varia devido á adsorção ou desadsorção de moléculas de água do ar na superfície interna dos poros.

O processo de adsorção das moléculas de água é constituído por três fases, a adsorção monomolecular , a adsorção plurimolecular e a condensação capilar [4,6].

- A adsorção monomolecular ocorre para humidades relativas baixas ($HR < 20\%$) e consiste na fixação das moléculas na superfície interior do poros.
- A adsorção plurimolecular, baseia-se na disposição de várias camadas de moléculas e ocorre para humidades relativas na ordem dos 50% .
- A condensação capilar ocorre quando o diâmetro dos poros é suficientemente pequeno e a humidade relativa é muito elevada criando a junção das camadas plurimoleculares, provocando o preenchimento integral dos poros, fenómeno descrito pela teoria de Kelvin [8].

Na tabela 2, estão representados os teores de humidade obtidos no ensaio experimental realizado por Vasco Freitas, para diferentes humidades relativas no do barro vermelho e betão celular.

Tabela 2 - Variação do teor de humidade com a humidade relativa do barro vermelho e betão celular [8].

Humidade Relativa HR (%)	Teor de Humidade W (kg/kg)			
	Barro Vermelho		Betão Celular	
	Absorção	Desabsorção	Absorção	Desabsorção
0	0	0	0	0
12	-	0,002	-	0,002
33	0,003	0,002	0,029	0,030
54	0,003	0,004	0,033	0,036
75	0,004	0,004	0,036	0,036
68	0,004	0,004	0,041	0,038
93	0,005	0,007	0,048	0,278
100	0,041	-	0,278	-

Na figura 4, encontra-se uma descrição convencional dos diferentes teores de humidade que um material pode exibir, nomeadamente a secagem artificial, o domínio higroscópico, o domínio capilar e a humidificação sob pressão [8].

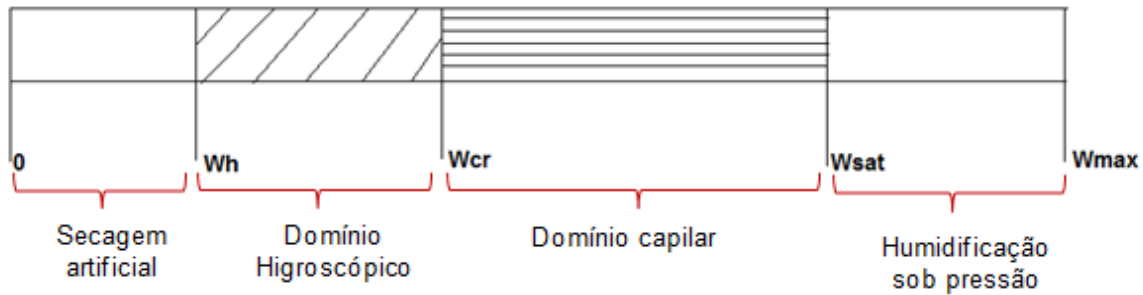


Figura 4 - Descrição convencional dos teores de umidade de referência de um material poroso.

A umidade higroscópica (W_h) varia entre teores de umidade igual a zero e o teor de umidade correspondente à umidade crítica (W_{cr}). O teor de umidade crítico ocorre quando um material está em contacto com uma ambiência saturada.

A umidade máxima (W_{max}) é atingida quando o teor de umidade em volume de um material é igual à sua porosidade aberta, isto é, quando todo o volume não ocupado pelo esqueleto sólido da estrutura porosa está completamente preenchido por água.

Devido à existência de ar dentro da estrutura porosa dos materiais a umidade máxima é dificilmente atingida, pelo que surgiu a necessidade de se definir o teor de umidade de saturação (W_{sat}).

O W_{sat} corresponde ao teor de umidade atingido por um material quando fica em contacto com água durante um certo período de tempo. Para determinados materiais o W_{sat} aumenta à medida que o tempo de contacto com a água é mais longo [8].

Na figura 5 encontra-se representado o fenómeno de adsorção, provocado pelas forças intermoleculares ou de Van der Waals que atuam na interface sólido-fluido, no interior dos poros.

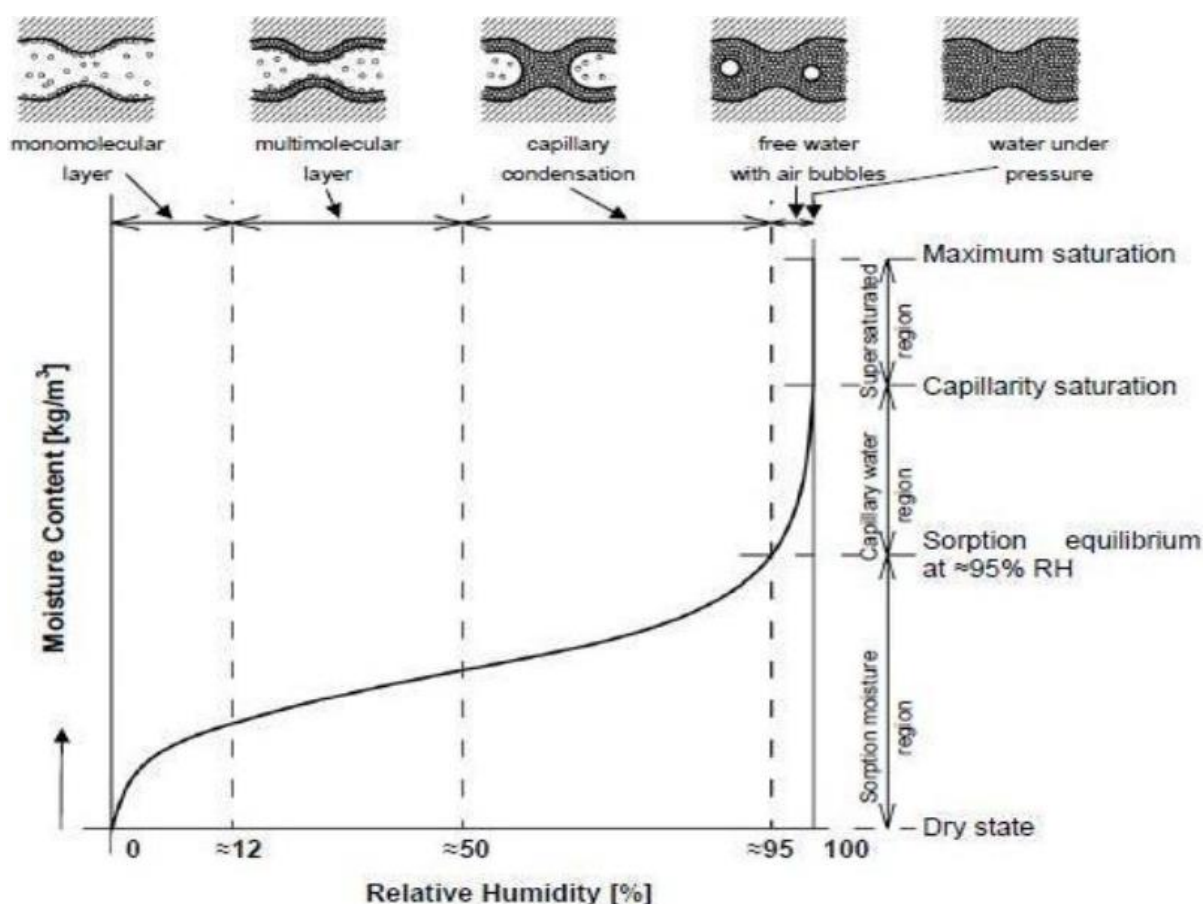


Figura 5 - Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da umidade relativa [9].

Segundo a teoria de difusão de vapor, sugerida por Glaser, as condensações ocorrem quando a pressão de vapor de um ponto no interior do elemento de construtivo é maior ou igual à pressão de saturação.

Existem dois tipos de condensações: as internas e as superficiais. As condensações superficiais surgem na superfície dos elementos de construtivos. As condensações internas são aquelas ocorrem no interior dos elementos construtivos [6].

Na figura 6 é apresentado o método de Glaser, que permite determinar graficamente a ocorrência de condensações. Através deste método há condensações internas quando a curva de pressões de saturação tiver pontos coincidentes com a curva de pressões instaladas [4]. Este método será mais desenvolvido na secção 2.4.

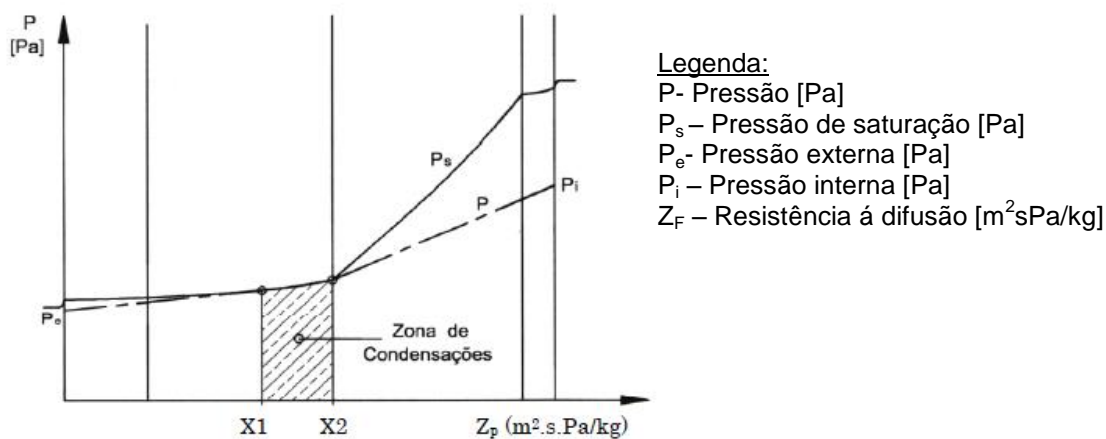


Figura 6 - ocorrência de condensações internas [4]

A **capilaridade** corresponde à transferência de água líquida através dos mesoporos de um material e ocorre quando as forças de atracção entre o material sólido e o líquido são mais fortes que as forças de coesão do líquido [5]. Este é o mecanismo de transferência de humidade mais comum nos materiais de construção e que será abordado na secção seguinte (2.3).

2.3. TRANSPORTE EM FASE LÍQUIDA

A absorção de água por capilaridade define a capacidade que os materiais porosos têm em absorver água quando estão em contacto com a água no estado líquido. Este fenómeno ocorre quando um material poroso é posto em contacto com água líquida, absorvendo-a devido ás pressões capilares existentes, até que se atinja o seu ponto de “saturação” (figura 6) [5,10].

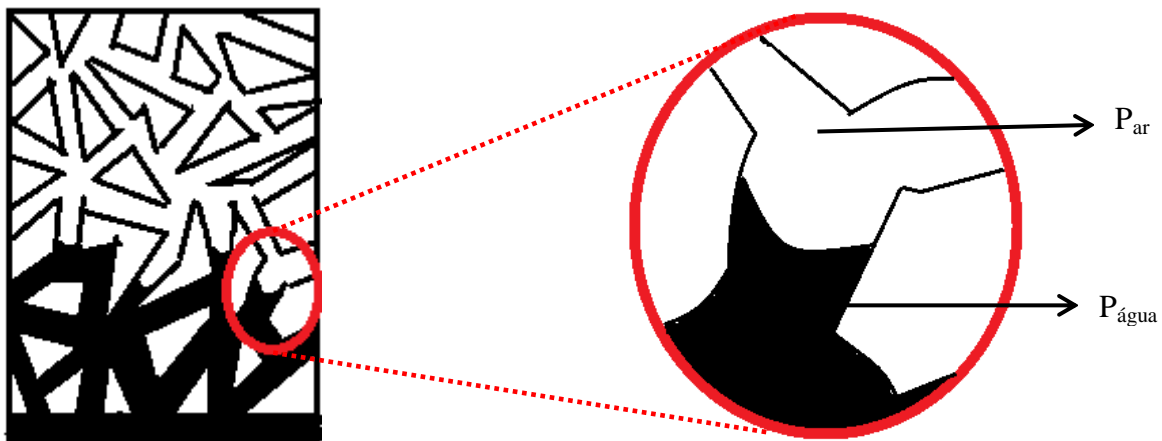


Figura 7 - Fenómeno da capilaridade

Este fenómeno provoca a formação de interfaces curvas entre o fluido e o ar contido nos poros dos materiais através da humificação da estrutura sólida [4, 6]. Estabelecendo um gradiente de pressões na interface líquido- gás, definido como pressão capilar. Quanto mais finos forem os poros maiores

são as forças capilares e consequentemente maior é a altura de água absorvida. Esta pressão depende do teor de humidade, da temperatura, da lei de distribuição do raio dos poros e da sua variação [11].

A pressão capilar pode ser determinada através da equação 1:

$$P_c = P_{ar} - P_{água} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cos \theta_h \quad [N/m^2] \quad (1)$$

Em que:

P_c – Pressão capilar $[N/m^2]$

P_{ar} – Pressão do ar $[N/m^2]$

$P_{água}$ – Pressão da água $[N/m^2]$

σ - Tensão superficial $[N/m]$

θ_h - ângulo de humificação $[\circ]$

R_1, R_2 – Raios de curvatura $[m]$

A água é absorvida por sucção capilar quando um material seco vai se humidificando progressivamente, por difusão quando as partículas de maior concentração se movem para as de menor concentração, e por osmose quando estamos perante uma água com a presença de sais [6, 12]. A sucção capilar vem expressa em metros de coluna de água e é determinada pela equação 2:

$$S = - \frac{P_c}{\rho_{água} g} \quad (2)$$

Em que:

S - Sucção capilar $[m \text{ H}_2\text{O}]$

P_c - Pressão Capilar $[N/m^2]$

$\rho_{água}$ - Massa volúmica da água $[kg/m^3]$

g - Aceleração da gravidade $[m/s^2]$

A rede capilar existente nos materiais de construção é muito complexa, pelo que a capilaridade não pode ser analisada para cada poro capilar, segundo a equação 2. Assim as propriedades capilares dos materiais podem ser simplificadaamente definidas através de ensaios de absorção de água por capilaridade tal como é proposto neste estudo.

O coeficiente de absorção ou também conhecido como coeficiente de capilaridade indica a massa de água absorvida por área devido as forças capilares.

O ensaio para determinação do coeficiente de capilaridade consiste na colocação de um material em imersão parcial, de forma a permitir que a absorção de água apenas ocorra pela sua base, e avaliar a

quantidade de água absorvida ao longo do tempo. A determinação deste parâmetro é desenvolvida com mais pormenor no capítulo do estudo experimental.

Na tabela 2 estão representadas a ascensão capilar e a velocidade de absorção de alguns materiais de construção aplicados em revestimentos de fachada. Estes resultados foram obtidos num estudo experimental em provetes de 10mm [2].

Tabela 3- revestimentos de fachada - avanços da frente húmida e velocidade de absorção [2]

Material	Avanço da frente húmida [min]	Velocidade de absorção $\times 10^{-6}$ [m/s]
Betão	63	2,65
Calcário (Moleanos)	15	11,11
Calcário (Moca)	7	23,81
Granito	21	7,94
Reboco	Com hidrófugo	17
	Sem hidrófugo	6
Tijolo	20	8,33

Analisando a tabela, verifica-se que independentemente do material, uma maior velocidade de absorção implica um menor tempo no avanço da frente húmida. De entre os materiais, o betão é o material que tem uma menor velocidade de absorção e um maior tempo do avanço da frente húmida e o reboco sem hidrófugo é o material que tem uma maior velocidade de absorção e consequentemente um menor tempo no avanço da frente húmida.

2.4. TRANSPORTE EM FASE VAPOR

O transporte de água em fase vapor ocorre quando o material é submetido a um gradiente de pressão de vapor [5]. Esta transferência pode dar-se das três seguintes formas [13]:

- Difusão de vapor através de uma camada de ar - a difusão ocorre através de uma camada de ar móvel;
- Difusão de vapor através de materiais porosos - a difusão ocorre através do mesmo processo que o anterior mas a resistência ao transporte depende da estrutura do material;
- Convecção- o vapor de água desloca-se com o ar seco, devido a gradientes de pressão e temperatura;

Relativamente á envolvente, a transferência de vapor pode dar-se das três seguintes formas:

- Entre o interior do elemento construtivo e as ambiências interiores;
- Entre o exterior do elemento construtivo e as ambiências exteriores;
- Entre o elemento construtivo através do gradiente de pressão parcial de vapor de água entre as ambiências exterior e interior.

Difusão de vapor de água através de elementos construtivos

A transferência de humidade por difusão de vapor de água através de elementos construtivos é dependente da diferença de pressões, da permeabilidade ao vapor de água dos materiais e das suas espessuras [13]. A humidade desloca-se da zona de maior pressão de vapor para a zona de menor pressão de vapor.

O fluxo de difusão é proporcional ao gradiente de concentração de vapor de água. Este pode ser determinado pela lei de Fick, representada pela equação 3[13]:

$$g = -\pi(T, HR) \times \frac{d_p}{d_x} \quad (3)$$

Em que:

g - densidade do fluxo de difusão de vapor de água [kg/(m²s)]

$\frac{d_p}{d_x}$ – Gradiente de concentração de vapor de água [Pa/m]

$\pi(T, HR)$ - Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, sob acção de um gradiente de pressão de vapor de água em função da temperatura e da humidade relativa – [kg/(m.sPa)]

Por simplificação é usual considerar que o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água é constante, ou seja $\frac{d\pi}{dT} = 0$ e $\frac{d\pi}{dHR} = 0$. No entanto o valor de π não é constante. Este varia com as condições ambientais no qual o material está inserido, principalmente a humidade relativa [13].

A permeabilidade ao vapor, é uma característica específica de cada material, que nos indica a quantidade de vapor (kg) que atravessa uma espessura unitária de material (m), por unidade de tempo (s), de superfície (m²) e de unidade de pressão do vapor (Pa) [5].

A transferência conjunta de calor e humidade em meios porosos não saturados, pode ser explicada por várias leis de difusão de massa e de difusão de calor. O método de Glaser é um dos modelos que nos explica este fenómeno [13].

O método de Glaser enuncia que se um elemento construtivo está submetido a um gradiente de pressões e temperaturas, então a pressão de saturação irá variar de ponto para ponto. Ocorrem condensações se a curva de pressões instaladas interceptar a curva de pressões de saturação (figura 6). Este método é recorrentemente utilizado na engenharia civil para a análise de riscos de ocorrência de condensações internas face à difusão do vapor [13].

O fluxo condensado é determinado através da lei de Fick, considerando que o fluxo condensado é igual á diferença entre os fluxos de entrada e saída do elemento construtivo, tal como indica a equação 4:

$$g_{condensado} = \left(\frac{P_i - P_x}{R_{d_{total}} - R_{d_x}} \right)_{x-x2} - \left(\frac{P_x - P_e}{R_{d_x}} \right)_{x-x1} \quad (4)$$

Em que:

$g_{condensado}$ – Fluxo condensado [kg/(m².s)]

P_i – Pressão parcial de vapor de água no interior [Pa]

P_e - Pressão parcial de vapor de água no exterior [Pa]

P_x - Pressão parcial de vapor de água instalada no ponto x [Pa]

$R_{d_{total}}$ - Resistência á difusão acumulada do elemento construtivo [-]

R_{d_x} - Resistência á difusão acumulada no ponto x.[-]

E que:

$$R_{d_j} = \sum_j \frac{e_j}{\pi_j} \quad (5)$$

Em que:

R_{d_j} – Resistência á difusão acumulada no ponto j [-]

e_j – Espessura da camada j [m]

π_j – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água da camada j [kg/(m².s)]

A curva de pressões de saturação pode ser determinada através do diagrama psicométrico e da distribuição de temperatura no interior de um elemento construtivo.

O diagrama psicométrico (figura 8) permite-nos relacionar os valores da temperatura do ar (abscissas) como os valores de humidade absoluta com a humidade relativa.

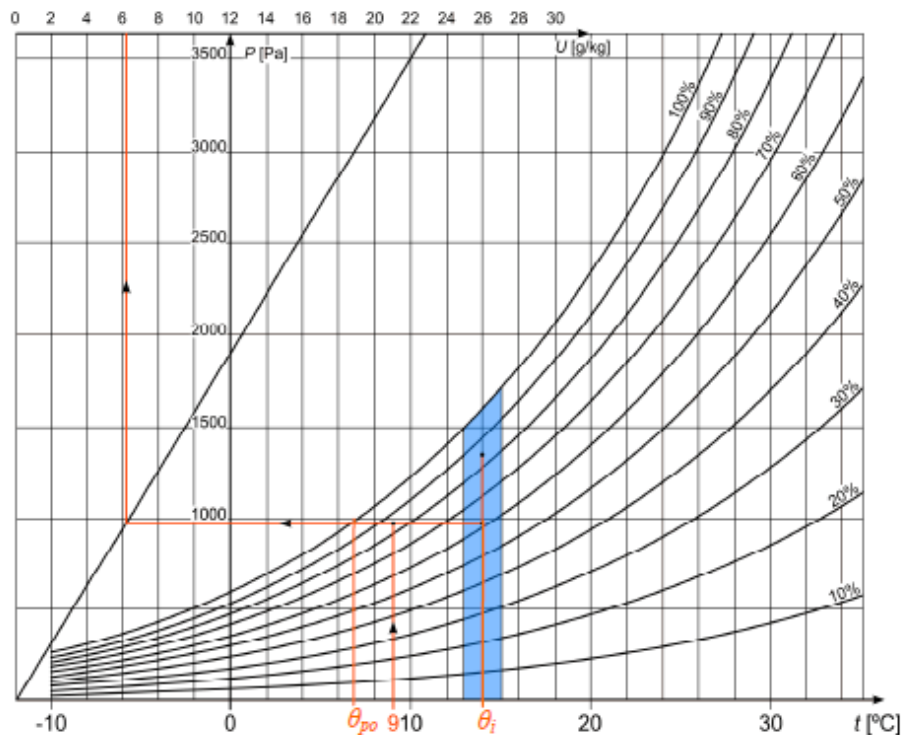


Figura 8- Diagrama psicométrico [4].

2.5. SECAGEM

A evaporação da água nos materiais de construção é uma propriedade física tão importante quanto a absorção de água, principalmente quando a água transporta sais solúveis. Esta pode ser definida pelo processo em que a água abandona o material poroso. O transporte líquido é realizado até à frente húmida estabilizar, evaporando e propagando-se no ambiente. Se a frente húmida não se localizar na superfície do material existe uma migração do vapor através do material e só posteriormente é que evapora para o meio ambiente [14].

A secagem é um processo muito complexo, que depende de factores externos (condições ambientes) e internos (teor e distribuição inicial de água, teor de humidade crítico do material e as suas propriedades de transporte de água na fase líquida e vapor).

O fluxo de secagem pode ser determinado pela expressão 6:

$$g = \beta(C'_s - C'_a) \quad (6)$$

Em que:

g – Densidade de fluxo, $[\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})]$;

β – Coeficiente de transferência superficial de humidade, $[\text{m}/\text{s}]$;

C'_s – Concentração de vapor de água a superfície, $[\text{kg}/\text{m}^3]$;

C'_a – Concentração de vapor de água no ar, $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Quando não existe uma grande diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura da superfície interior das paredes, para uma humidade relativa elevada, o fluxo de secagem tende para zero, situação dos edifícios históricos e patrimoniais [4].

A secagem total apenas se consegue atingir através de métodos de secagem artificial. Na física das construções um material é considerado seco quando em determinadas condições de temperatura e humidade relativa não há variações significativas na sua massa durante um espaço de tempo pré-definido [8].

Neste trabalho foi usado o método de secagem natural que será abordado com mais pormenor no capítulo do estudo experimental.

2.6. FORMAS DE MANIFESTAÇÃO DA HUMIDADE

A humidade tem várias formas de manifestação. Na prática são raros os casos em que existe a manifestação de apenas um tipo de humidade, ocorrendo geralmente a sobreposição de uma ou vários tipos de humidade.

Na tabela 4 estão representados os tipos de humidade mais frequentes e o correspondente estado em que ocorre a sua transferência [3]:

Tabela 4 - Tipos de humidade

Forma de manifestação	Tipo de manifestação
Humidade ascensional	Fase líquida
Humidade na construção	Fase vapor/ Fase líquida
Infiltrações	Fase líquida
Condensações internas	Fase vapor/ Fase líquida
Condensações superficiais	Fase líquida
Higroscopicidade dos materiais	Fase vapor
Fugas nas canalizações	Fase líquida

A **humidade ascensional** é causada pelo mecanismo da capilaridade. Este tipo de humidade é o mais frequente e um dos principais factores de degradação das edificações mais antigas, em que a humidade solo ascende nas paredes e pavimentos dos edifícios através da estrutura porosa dos materiais de construção. Esta apenas ocorre quando a água se encontra em fase líquida, penetrando nos materiais por sucção capilar, difusão e osmose.

A água absorvida pode ser proveniente das águas freáticas ou das águas superficiais, como exemplifica a figura 9. Quando se tratam de águas freáticas a manifestação da humidade ascensional é mais constante ao longo do ano, uma vez que se tratam de fontes de água que estão activas ao longo do ano. Em contra partida quando se tratam de águas superficiais a manifestação da humidade é variável ao longo do ano, atingindo o seu pico normalmente no inverno.

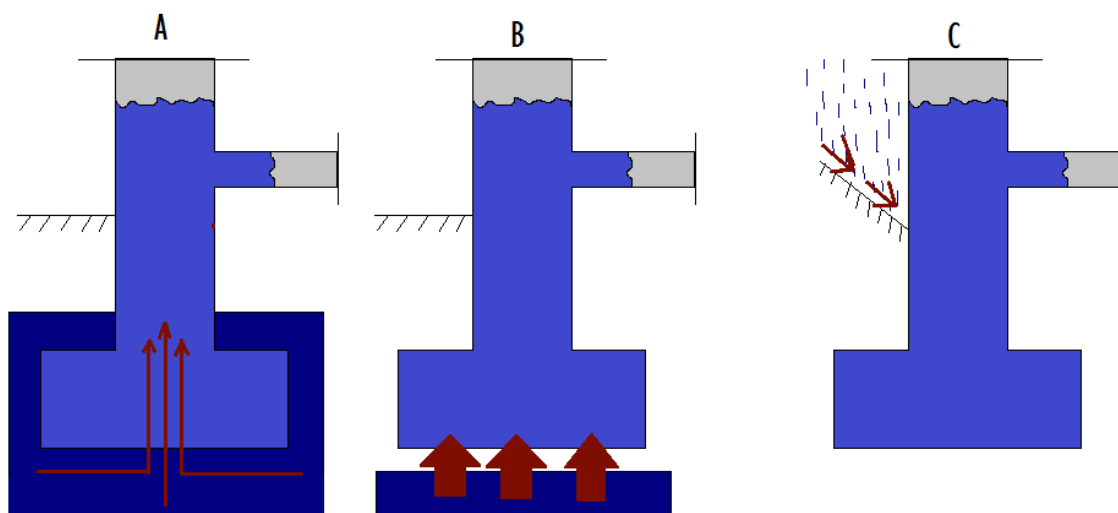


Figura 9 - vários tipos de ascensão da água. A e B - Águas subterrâneas C- Águas superficiais

A altura da ascensão capilar atingida num elemento construtivo relaciona-se com várias condições, nomeadamente com as condições de evaporação á superfície, e espessura, a área da superfície em contacto, a orientação e a presença de sais [3].

2.7. FACTORES CONDICIONANTES NA HUMIDADE ASCENSIONAL

Os materiais de construção podem fixar e transportar a água sob diversas formas. Perceber a capacidade dos materiais de construção em fixar e transportar humidade é essencial, assim como perceber quais os factores que condicionam essa capacidade.

A humidade ascensional é influenciada pelos seguintes factores [3, 4]:

- Condições climáticas das ambiências (temperatura e humidade relativa);
- Insolação;
- Presença de sais;
- Porosidade e porometria dos materiais;
- Espessura da parede e natureza dos materiais de revestimento.

Condições climáticas das ambiências

As condições climáticas da ambiência interior e exterior são um dos grandes factores que condiciona o nível atingido pela frente húmida e o processo de secagem. O nível atingido pela frente húmida será maior para locais com elevada humidade relativa, e menor para locais com baixa humidade relativa. A secagem será mais rápida para locais com baixa humidade e mais lenta para locais com elevada humidade relativa.

Insolação

A insolação também condiciona a progressão da frente húmida e o processo de secagem nos elementos construtivos. Os elementos construtivos apresentam diferentes níveis atingidos pela frente húmida para diferente insolação, geografia e ventilação.

O processo de secagem é influenciado pela radiação e insolação uma vez que estas alteram a temperatura superficial dos elementos construtivos.

Presença de sais

A presença de sais na água que ascende os elementos construtivos é um dos principais factores de degradação dos materiais. A deterioração é provocada pela formação de sal nas estruturas porosas, principalmente quando os materiais estão sujeitos a ciclos de cristalização e dissolução devido a variações no teor de humidade.

A temperatura tem alguma influência neste processo, uma vez que a solubilidade dos sais depende desta.

A presença de sais pode provocar as seguintes sintomas e anomalias nos elementos construtivos:

- Alterações superficiais (eflorescências ou manchas de humidade);
- Fendilhação;
- Formação de crostas;
- Separação dos materiais da alvenaria em camadas (delaminação, esfoliação, destacamento de camadas dos rebocos, etc.);
- Perda de coesão (pulverulência de elementos de tijolo cerâmico ou de pedra, amenização de argamassas, etc.);
- Formação de vazios (como a alveolização).

Os sais mais comuns são:

- Carbonatos, que sob a acção de CO₂ se transformam em bicarbonatos;
- Cloretos, que absorvem grandes quantidades de água;
- Nitratos, de origem orgânica, sendo mais comum o nitrato de cálcio, que cristaliza para uma temperatura de 25°C humidade relativa de 50%;
- Sulfatos, higroscópicos e solúveis, que cristalizam com um aumento do seu volume. Sendo os mais comuns: o sulfato de cálcio, de sódio e de magnésio.

Porosidade e porometria dos materiais

Os materiais de construção são na sua maioria materiais porosos. A porosidade exprime a relação entre o volume de vazios dos poros e o volume total do corpo, podendo ser definida pela equação 7 [6]:

$$\varepsilon = \frac{V_a + V_l}{V_t} \quad (7)$$

Em que:

ε – Porosidade;

V_a – Volume fase gaseosa [m³];

V_l – Volume da fase líquida [m³];

V_t – Volume fase sólida [m³].

Os materiais absorvem maiores ou menores quantidades de água consoante a sua porosidade. A ascensão capilar é tanto maior quanto menor for o diâmetro dos tubos capilares (ver secção 2.1).

Espessura da parede e natureza dos materiais de revestimento

A espessura das paredes condiciona a altura atingida pela humidade ascensional, uma vez que quando se passa de uma espessura de 0,20m para 1,00m a altura atingida pela humidade tem acréscimos significativos, como demonstrado na figura 10 [6,15].

O tipo de materiais de revestimento também influencia a altura atingida pela humidade.

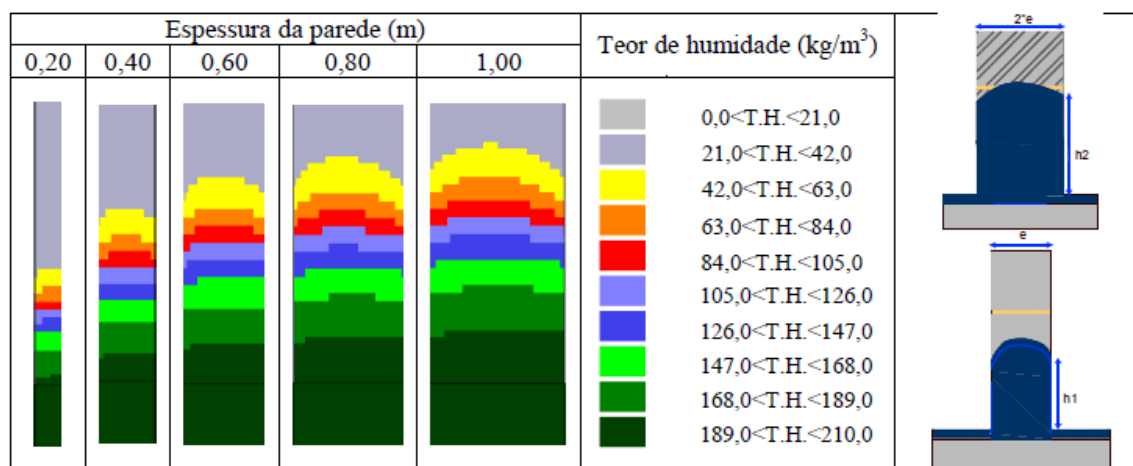


Figura 10 - Variação do teor de humidade ao longo da secção transversal [15]

Quando se impermeabiliza uma parede diminuem as condições de evaporação e, conseqüentemente aumenta o nível de humidade ascensional na parede, como se verifica na Figura 10. Assim, quanto menos permeável ao vapor é o revestimento, maior é o nível atingido pela humidade ascensional.

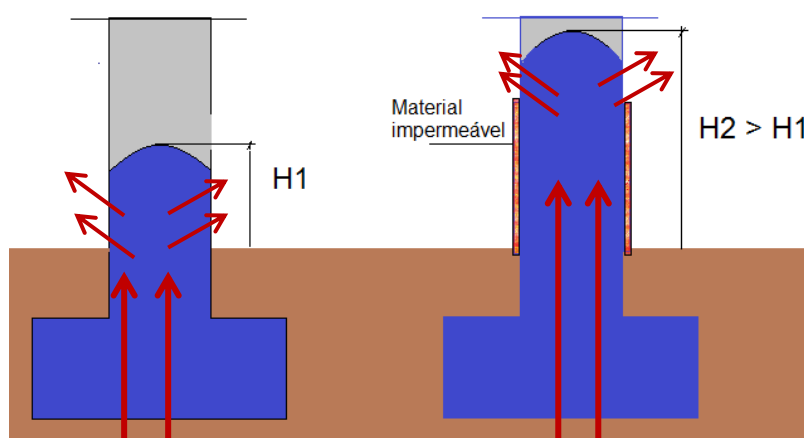


Figura 11 - influência da colocação de material impermeável na humidade ascensional.

2.8. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE HUMIDADE ASCENSIONAL

Avaliar as diferentes metodologias de reparação da humidade ascensional e procurar a solução mais adequada para a sua eliminação é uma tarefa difícil. A eficácia das soluções nem sempre é total, pelo que deve ser analisada a melhor opção entre o custo e a eficácia.

Os métodos mais comuns no tratamento da humidade ascensional em paredes de edifícios são [4]:

- Execução de corte hídrico;
 - Introdução de barreiras físicas
 - Introdução de barreiras químicas
- Redução da secção absorvente;
- Introdução de tubos de arejamento;
- Electro osmose (passiva, semi - passiva, ativa, forese);
- Ocultação das anomalias;
- Ventilação da base das paredes.

Execução de corte hídrico

Esta solução deve ser utilizada em situações que o elemento construtivo está constantemente em contacto com o nível freático.

Esta tecnologia consiste em criar uma barreira contínua na base das paredes que impossibilite a ascensão de água. Pode ser feita através da introdução de barreiras físicas ou barreiras químicas. Estas técnicas não devem ser implementadas no património monumental, por razões estruturais, estéticas e económicas.

Introdução de barreiras físicas

Esta técnica baseia-se na substituição de partes da alvenaria por materiais estanques (como por exemplo membranas betuminosas e placas de chumbo) em toda a espessura da parede, (figura 12).

O método de Schoner Turn consiste na introdução de chapas de aço inoxidável onduladas em paredes. A introdução das chapas é realizada com recurso a martelos pneumáticos que provocam vibrações na estrutura, pondo em causa a sua estabilidade. Esta tecnologia apenas deve ser introduzida em alvenarias construídas elementos regulares e por juntas horizontais contínuas e bem definidas.

O método de Massari baseia-se na execução de carotagens sucessivas em troços com cerca de 45cm a 50 cm. Na primeira série os furos circulares são tangentes uns aos outros, e na segunda série os centros dos furos coincidem com os pontos de tangencia dos anteriores. Depois de se efectuar os furos efectua-se a sua limpeza, e de seguida o seu enchimento com argamassa de ligantes sintéticos.

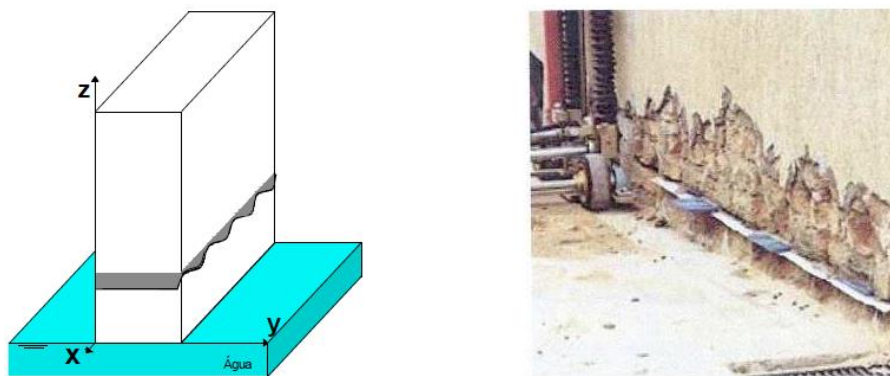


Figura 12 - Barreiras físicas [4]

Introdução de barreiras químicas

A realização de barreiras químicas consiste na introdução de materiais sintéticos que criam uma barreira estanque (figura 13). Estas barreiras devem ser colocadas o mais próximo possível do nível do terreno.

A sua execução baseia-se na realização de furos espaçados 10cm a 20cm e com uma profundidade de 2/3 da espessura da parede seguindo-se da introdução dos produtos de tratamento através da difusão ou injeção.

Na difusão os produtos são introduzidos através da gravidade. Na injeção os produtos são introduzidos na parede com recurso a um equipamento de pressão, tendo a vantagem de facilitar a expulsão da água contida nos poros e a penetração do produto.

Esta técnica é pouco eficiente em paredes de grande espessura e com grande heterogeneidade dos materiais constituintes.

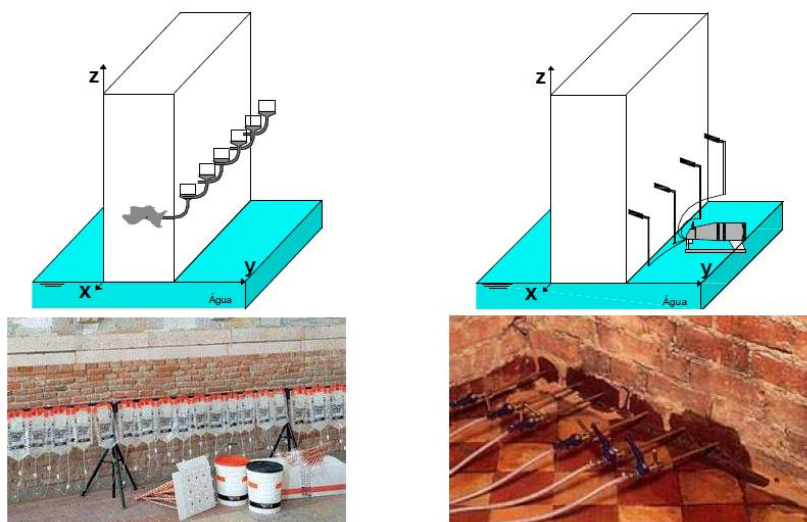


Figura 13 - Barreiras químicas [4]

Redução da secção absorvente

Esta tecnologia consiste em diminuir a secção absorvente, através da substituição parte do material por espaços de ar (figura 14). Estes espaços de ar, permitem que a quantidade de água absorvida seja menor e uma mais fácil evaporação.

É uma técnica pouco usada, devido a questões arquitectónicas e estruturais e por ser de difícil aplicação em edifícios com paredes muito espessas.

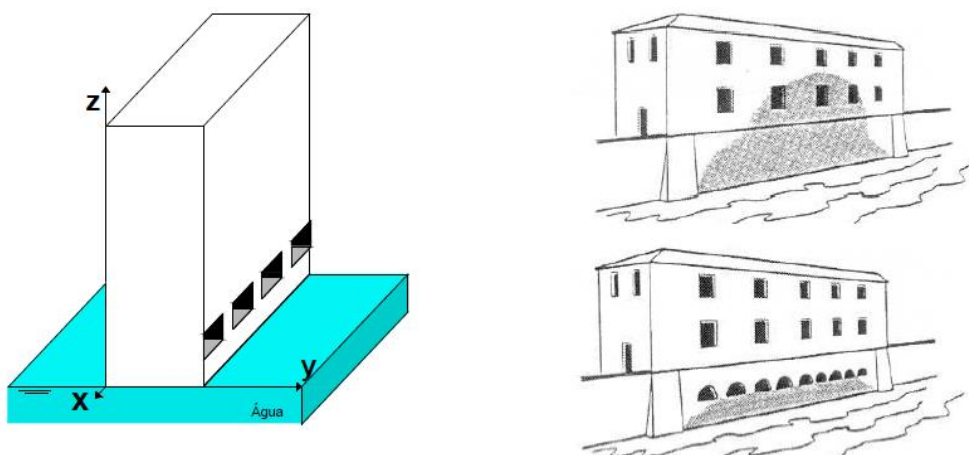


Figura 14 - Redução da secção absorvente [4].

Introdução de tubos de arejamento

Esta tecnologia, método de Knapen, baseia-se na introdução de tubos para facilitar a ventilação e a secagem dos elementos construtivos (figura 15). Permite ainda diminuir o potencial capilar. Apesar de muito económico, é um processo pouco eficaz e com pouca estética.

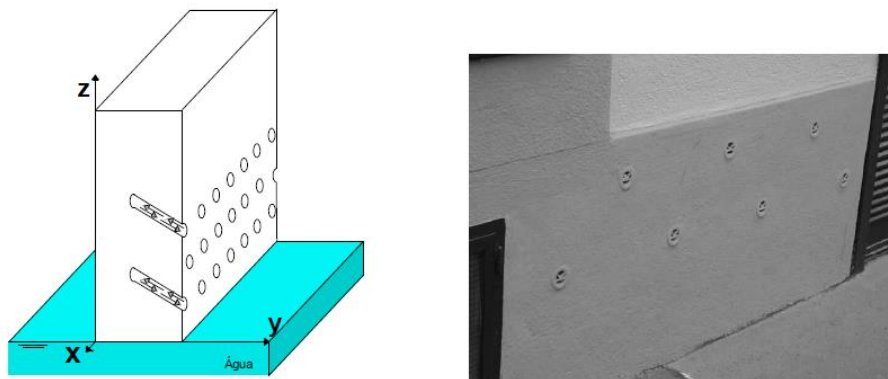


Figura 15 - tubos de arejamento [4]

Electro osmose (passiva, semi - passiva, ativa, forese)

A tecnologia da electro osmose consiste em sistemas electro-osmóticos que criam um potencial eléctrico contrário ao potencial capilar (figura 16). Podem ser utilizadas técnicas ativas, semi-passivas e passivas. É uma técnica com pouca eficácia e por isso pouco utilizada nos dias de hoje.

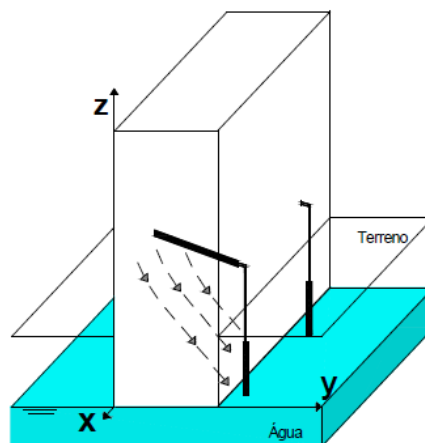


Figura 16 - sistemas electro osmóticos [4].

Ocultação das anomalias

Quando não se pode actuar sobre as causas do problema, actua-se sobre as manifestações das anomalias. Esta é a base desta tecnologia de tratamento.

É uma técnica que consiste na colocação de uma nova parede no interior, separada por um espaço de ar ou através da colocação de materiais de porosidade e porometria controladas no exterior da parede (figura 17).

No caso da colocação de nova parede no interior a forra deve estar afastada de 5cm a 10cm da parede principal, sem qualquer tipo de contacto, a sua base deve ser impermeabilizada, e o espaço de ar deve ser ventilado para o exterior.

No caso da criação de novo revestimento, este deve ser executado de maneira a que a porosidade das camadas vá diminuindo, facilitando as condições de evaporação á superfície e fazendo com que a cristalização de sais ocorra nas camadas internas, protegendo a parede.

Esta técnica é de difícil implementação, uma vez que nem sempre é possível a ocultação das paredes originais. Para além do facto de provocar uma redução da área útil das edificações.

a) Materiais de porosidade e porometria controlada

b) Nova parede interior

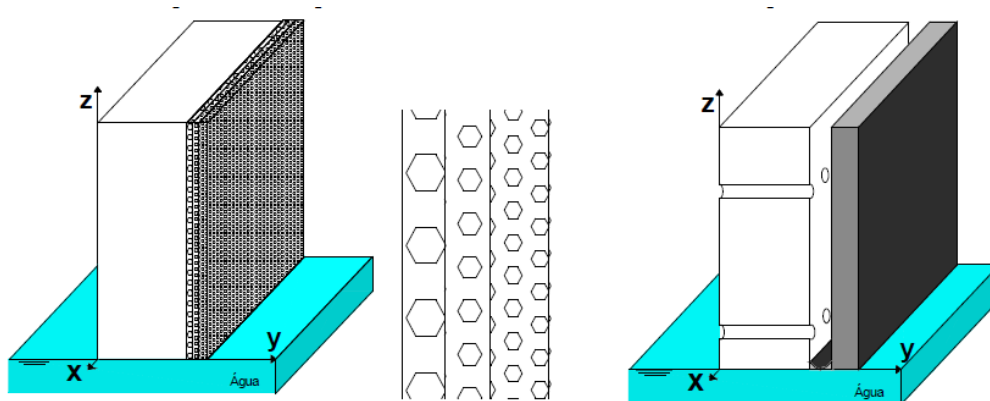


Figura 17 - ocultação das anomalias [4].

Ventilação da base das paredes

Esta tecnologia é a mais recente de todas até aqui referidas, e consiste em ventilar a base das paredes recorrendo a um processo natural ou instalado um dispositivo mecânico higro-regulável (figura 18). Permite a secagem das paredes, reduzindo a ascensão capilar.

Apesar de ser uma técnica que tem revelado grandes potencialidades esta só pode ser utilizada para casos em que o nível freático está abaixo do dispositivo de ventilação.

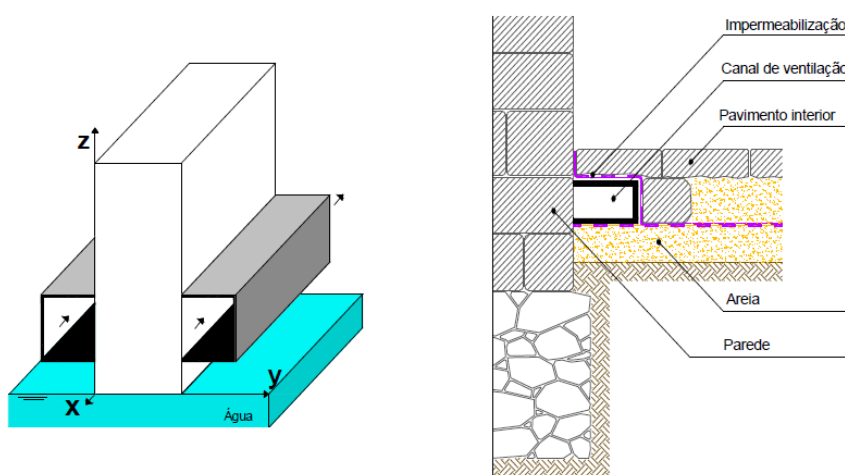


Figura 18 - Ventilação da base das paredes [4].

A tabela 5 apresenta um quadro resumo com a eficácia, a polivalência, o aspecto e as limitações de cada uma das técnicas de tratamento da humidade ascensional referidas.

Tabela 5 - resumo das técnicas de tratamento da humidade ascensional [4].

Solução	Método	Eficácia	Polivalência*	Aspecto ⁺	Limitações
Execução de corte hídrico	Barreiras físicas	Boa	Boa	Médio	Vibrações. Instabilidade. Aplicável a apenas a alvenarias resistentes com juntas regulares
	Barreiras químicas	Muito Boa	Muito Boa	Bom	Têm que ter uma barreira continua em toda a espessura da parede. Dificilmente eficaz em paredes muito espessas e muito heterogêneas.
Electro- osmose		Média/ Má	Boa	Bom	Inadequado quando a resistência do terreno é elevada.
Redução da secção absorvente		Má	Média	Médio	Estruturais e arquitectónicas.
Introdução de tubos de arejamento		Má	Média	Bom	Estéticas. Pouca eficácia.
Ocultação das anomalias	Revestimento com porosidade e porometria controladas	Média	Média	Bom	Implica o aparecimento de efluorescências. Não é aplicável em paredes não rebocadas.
	Forra interior separada por um espaço de ar	Boa	Média	Bom	Diminui as áreas úteis. Se não for possível ventilar pode não apresentar os resultados esperados. Não permite a visualização da parede original.
Ventilação da base das paredes		Muito Boa	Boa	Bom	Instabilidade estrutural. Apenas executável acima do nível freático. Tratamento contínuo em toda a parede.

* Resultado da utilização da solução em causa em diferentes materiais e tipos de paredes.

+ Aspecto estético das alvenarias na zona tratada

3

O FENÓMENO DA INTERFACE

3.1. INTRODUÇÃO

Os edifícios e estruturas de engenharia civil são construídos por camadas de diferentes materiais, com diferentes propriedades hígricas. As alvenarias são o elemento construtivo mais comum na construção, sendo estas um grande exemplo de paredes compostas por diferentes camadas. Estas paredes estão expostas à chuva, condensações, humidade ascensional, entre outras causas naturais que provocam a sua degradação ao longo do tempo. A humidade ascensional manifesta-se nas paredes das construções quando em contacto com a água ou com do solo húmido, devido á elevada capilaridade os materiais e á inexistência de um corte hídrico eficaz.

As alvenarias são paredes constituídas por blocos de cerâmica, betão ou pedra unidas por argamassa. A principal funcionalidade da argamassa é garantir a ligação entre os blocos. Estas devem ser duráveis, ter uma boa resistência aos esforços aplicados, boa estanqueidade e capacidade de retenção de água, e ainda ter características de boa elasticidade e trababilidade [16].

As juntas e ligantes de argamassa podem ser um dos percursos mais fáceis para a humidade ascender nos edifícios. A água alcança um tijolo quando percorre a junta de argamassa à sua volta (figura 19). Com boas características hidrófugas das argamassas e com uma correcta aplicação destas pode-se impedir/reduzir a entrada de água e humidade nos edifícios [3].

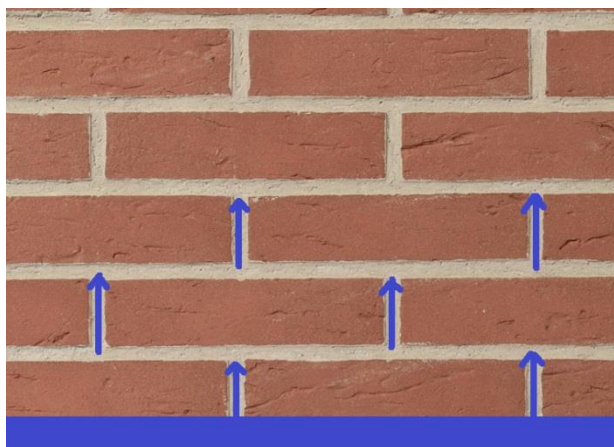


Figura 19 - Transporte de água pelas juntas

As juntas para além de poderem influenciar no fenómeno da ascensão de água, permitem atenuar a transferência de esforços e tensões, acomodar pequenas variações dimensionais toleradas em projecto, permitir as movimentações de retracção causada por hidratação do cimento, expansão, variação

térmica vibrações, permitir mudança de planos de fachada entre outros, pelo que se revelam uma boa hipótese para solução de muitos dos problemas das edificações [17].

A água líquida e o vapor de água penetram e movem-se no interior das alvenarias devido aos seguintes mecanismos: adsorção de vapor, difusão iónica e gasosa, evaporação, convecção, adsorção de água, efeitos capilares e permeabilidade associada a diferenças de pressão [18].

A absorção de água de um material de construção vai depender da capilaridade do mesmo. Num elemento composto por dois materiais, como é o caso das alvenarias, espera-se ter dois diferentes coeficientes de absorção de água, pelo que espera-se também uma diferente capilaridade do composto.

Nas paredes de alvenaria e em outros tipos de paredes constituídas por duas ou mais camadas, é importante perceber a influência da interface, uma vez que na ligação das camadas existe uma descontinuidade que influencia a molhagem e secagem de forma significativa. Para estudar o impacto da interface entre as camadas é importante perceber qual a relação e diferença do coeficiente de absorção de uma parede multicamadas e uma parede monolítica [20].

As argamassas podem apresentar diferentes resistências na interface depende do seu teor de água. Numa argamassa mole a resistência da interface é insignificante, numa argamassa curada molhada é intermédia e numa argamassa curada seca é alta, ou seja a resistência da interface é directamente relacionada com a extracção de água durante a cura [19]. Estas apresentam ainda diferentes propriedades de absorção quando secas ou moles. O teor de humidade capilar e coeficiente de absorção capilar são elevados para argamassa mole, intermédios para argamassa curada molhada, e baixos para argamassa curada seca. Podendo-se então dizer que o teor de humidade e o coeficiente de absorção estão inversamente relacionados com a extracção de água durante a cura da argamassa [19].

O processo de cura influencia as propriedades hídricas das argamassas através da diminuição do tamanho dos seus poros que conduz a uma menor porosidade aberta e consequentemente a um menor coeficiente de absorção de água e a uma baixa difusividade. Assim, quanto mais seca é a argamassa, menor porosidade, menor é o seu teor de humidade capilar, menor é a quantidade de poros grossos, menor é a sua difusividade e menor é o seu coeficiente de absorção de água [21].

A existência de uma interface de resistência das argamassas pode ser explicado pelo facto de a extracção de água a partir de argamassa conduzir a um transporte das partículas finas do cimento, resultando em um bloqueio dos poros e levando a uma resistência de interface entre o tijolo e argamassa. A incompatibilidade entre os diferentes sistemas de poros de tijolo e da argamassa também pode contribuir para uma resistência da interface, uma vez que o raio médio de um poro do tijolo pode ser cerca de 100 vezes maior do que o raio médio do poro de uma argamassa. As microfissuras entre argamassa e o tijolo criadas pela secagem e retracção da argamassa podem conduzir a uma adicional resistência na interface [21].

Estudar a influência da interface entre as camadas na embebição das paredes, é um dos principais objectivos deste trabalho. Para tal foram realizados ensaios laboratoriais em provetes monolíticos e de multicamadas e comparados os seus resultados.

Existem três tipos de interfaces: contacto perfeito, continuidade hidráulica e espaço de ar entre camadas [8]. Cada um dos tipos influencia a ascensão capilar e a secagem dos materiais de diferente modo. Neste capítulo serão então abordados os diferentes tipos de interface e a influência desta no fenómeno de embebição e secagem.

3.2. TIPOS DE INTERFACE

São raras as paredes constituídas apenas por um material, geralmente existindo pelo menos dois materiais na constituição de uma parede. Os materiais de construção têm uma estrutura porosa muito fina criando forças capilares muito maiores que as forças gravitacionais, permitindo que os efeitos da gravidade sejam desprezados na análise dos fluxos de humidade [6]. Se o efeito da gravidade for desprezado, considera-se que os fluxos na zona corrente da parede são unidireccionais [8].

Na constituição de uma parede diferentes tipos de materiais interagem de diferentes formas influenciando os mecanismos e fenómenos relativos à humidade. A interface (contacto) entre os materiais é mais um dos factores que influencia esses mecanismos. Numa parede a interface pode tomar um dos diferentes três tipos: “continuidade hidráulica”, “contacto perfeito” e espaço de ar entre as camadas [8].

- Nas **interfaces de “continuidade hidráulica”** existe interpenetração da estrutura porosa entre as duas camadas. É o caso das paredes “in situ” e de materiais como gesso, argamassa, betão, etc..
- Nas **interfaces de “contacto perfeito”** as camadas são justapostas existindo contacto entre as camadas mas sem a interpenetração da estrutura porosa, criando uma resistência hídrica.
- Nas **interfaces com espaço de ar entre camadas** existe um espaço de ar com milímetros de espessura, não havendo contacto entre as camadas. O transporte de humidade apenas se faz na fase vapor, devido ao corte hídrico que impede a transferência em fase líquida.

Brocken et al observaram que numa alvenaria (interface de “contacto perfeito”) apenas 20-30% da área de superfície da argamassa seca está em total contacto com o tijolo, sendo então na pratica difícil existir um contacto perfeito entre as camadas. [22].

Na figura 20 estão esquematizados os três diferentes tipos de interfaces.

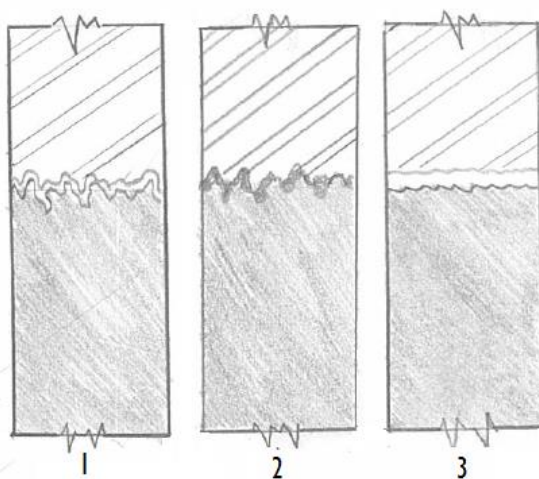


Figura 20 - Tipos de interface

3.3. INFLUÊNCIA DA INTERFACE NA HUMIDADE ASCENSIONAL

3.3.1. INTRODUÇÃO

Os materiais de construção utilizados nas alvenarias devem ter um baixo coeficiente de absorção de água para impedir que esta ascenda pelas paredes. No entanto esta deve ser a suficiente para que permita a aderência às argamassas.

Em paredes monolíticas a humidade ascensional depende das condições das ambiências (temperatura, humidade relativa, precipitação, radiação solar e pressão do vento) e das características dos materiais [12].

Em paredes multicamada a humidade ascensional depende das características de uma parede monolítica e depende ainda de resistência hídrica criada entre as camadas. A resistência hídrica consiste no fluxo máximo transmitido, isto é, a maior ou menor facilidade de difusão da água [8].

“Continuidade hidráulica”

Perante a “continuidade hidráulica” o fluxo térmico que sai da primeira camada é igual ao fluxo térmico que entra na segunda camada, existindo uma continuidade da temperatura.

O mesmo acontece para o fluxo de humidade, em que o fluxo de humidade que sai da camada 1 é igual ao fluxo de humidade que entra na camada 2, com continuidade de pressão capilar. No entanto o teor de humidade da camada 1 (W_1) é diferente do teor de humidade da camada 2 (W_2).

Sabendo que $W_1 = RW_2$ a igualdade de pressão capilar permite relacionar o teor de humidade da camada 1 com o teor de humidade da camada 2 na interface através da expressão $R(P_c)$, (figura 21)[11].

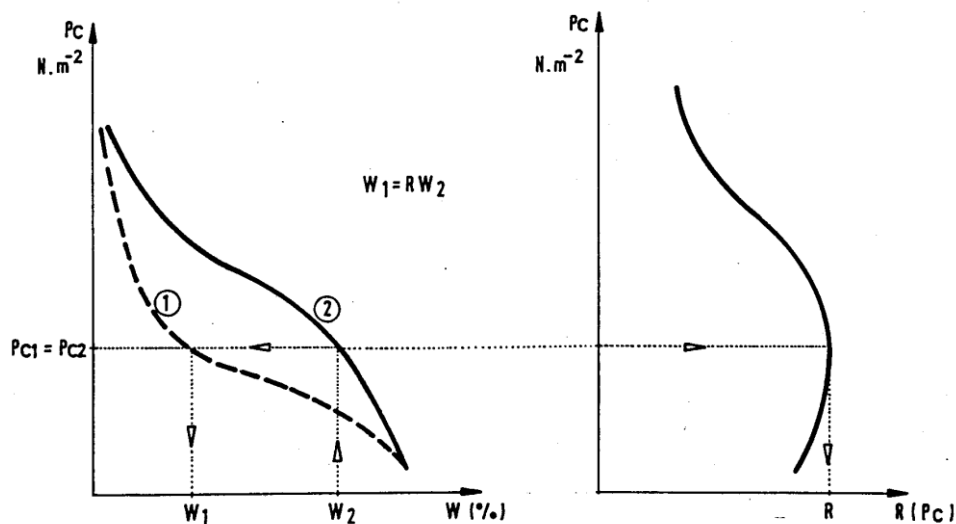


Figura 21 - Princípio de cálculo da relação $R(P_c)$ [8].

“Contacto perfeito”

No caso da interface de “contacto perfeito” verifica-se uma continuidade da temperatura e igualdade de fluxos térmicos na entrada e saída. Devido à resistência hídrica criada pela descontinuidade da estrutura porosa é imposto um fluxo máximo. Assim o fluxo de humidade que sai da camada 1 é igual ao fluxo que entra na camada 2, e não superior ao fluxo máximo.

A pressão capilar e o teor de humidade são diferentes nas duas camadas, ou seja $P_{c1} \neq P_{c2}$ e $W1 \neq W2$

Separadas por espaço de ar

Num regime isotérmico para interfaces separadas por um espaço de ar, o fluxo de humidade que sai na camada 1 é igual ao fluxo de humidade que entra na camada 2, mas limitado pelo fluxo máximo de vapor transmitido pelo espaço de ar. O fluxo máximo de vapor transmitido pelo espaço de ar é dependente da espessura do espaço de ar e da pressão de vapor nas duas superfícies. Existe continuidade da humidade relativa ($HR1=HR2$) se o teor de humidade crítico (W_{cr}) for superior ao teor de humidade da camada com maior humidade.

Quando o teor de humidade de uma das camadas é superior ao W_{cr} , a camada com menor teor de humidade tende a ter o teor de humidade crítico desse material.

Com uma igual humidade relativa é possível estabelecer uma relação de teor de humidade entre ambos os materiais na interface ($W1=S \times W2$), através da relação de $s(\varphi)$ (figura 22).

Em regime não isotérmico torna-se um problema ainda mais complexo devido à possibilidade de ocorrência de condensações na interface.

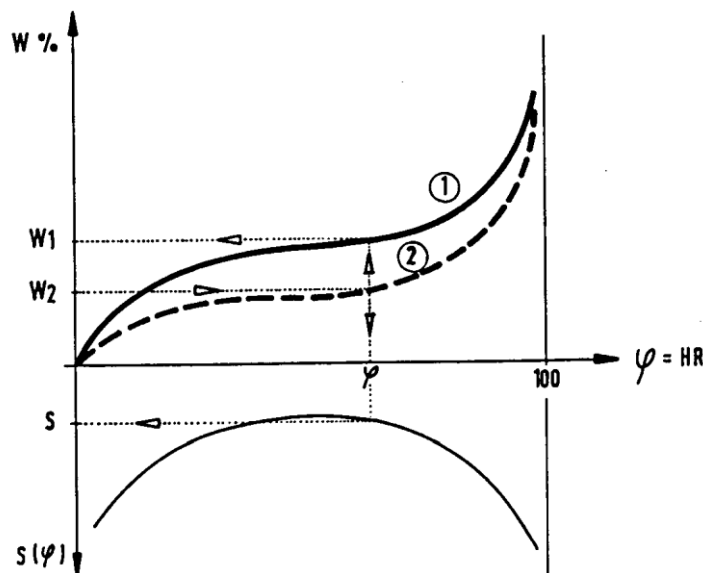


Figura 22 - princípio de cálculo da relação $s(\varphi)$ [8].

Numa parede multicamada de contacto perfeito com materiais de diferentes capilaridades, capilaridade alta no primeiro e capilaridade baixa no segundo, a taxa de absorção é reduzida após a água passar a interface entre os dois materiais. Após a água passar a interface a taxa de absorção torna-se a mesma que a taxa de absorção de um provete monolítico do segundo material sozinho, ou seja a absorção do composto é controlada pelas propriedades do segundo material (figura 23) [23].

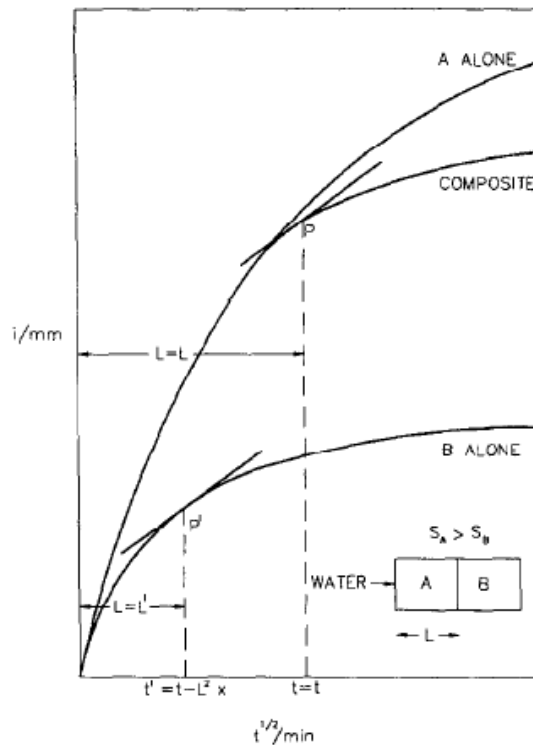


Figura 23 – Absorção de um provete constituído por dois materiais em que o primeiro tem um maior coeficiente de absorção que o segundo ($S_A > S_B$) [23]

Durante o tempo necessário para saciar o primeiro material haverá uma menor quantidade de água disponível para a absorção do segundo material, que conduz a uma redução na taxa de absorção do provete [24].

Quando a capilaridade primeiro material é menor que a capilaridade no segundo material ($S_A < S_B$) a absorção de água é inicialmente controlada pelas propriedades do primeiro material até se atingir a junta [24].

Neste trabalho apenas serão estudadas interfaces com um “contacto perfeito”, através de provetes com juntas de argamassa analisados por via experimental. Foram construídos provetes com duas camadas de tijolo maciço interligadas por uma camada de argamassa. Apesar de na prática ser muito difícil de se obter, considerou-se que os provetes construídos criam um “contacto perfeito” entre as camadas.

No capítulo 4 é abordado esse ensaio experimental de absorção de água em provetes de “contacto perfeito” mas com diferentes características (provetes com camadas com dois tipos de argamassa com 1cm e 2cm de espessura e a 11cm e 22cm de altura), onde se pode concluir que quando a humidade atinge a interface existe um atraso na embebição do provete devido à resistência hídrica criada pelo contacto perfeito entre as camadas. Este retardamento da embebição ocorre em diferentes momentos dependendo da altura a que se encontra a interface.

3.3.2. RESULTADOS EXPECTÁVEIS NA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Antes de se obter os resultados do ensaio de absorção deste trabalho, através dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso e da bibliografia pesquisada eram já esperadas algumas conclusões e suposições sobre o comportamento dos materiais e da absorção de água nos provetes.

A partir da bibliografia pesquisada era de esperar que o gráfico da absorção de água do provete monolítico (tijolo sem juntas) apresentem um comportamento da figura 24.

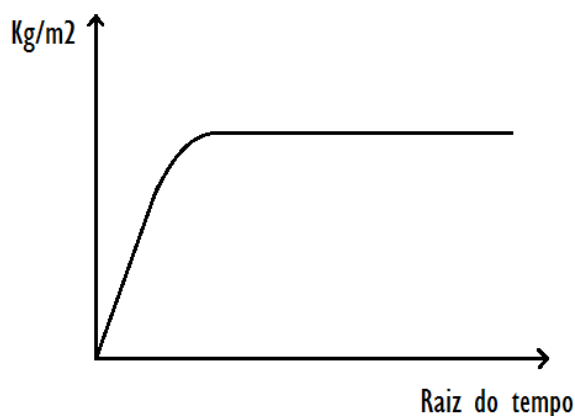


Figura 24 - Gráfico esperado para comportamento da absorção no provete monolítico

Era de esperar que dependendo do tipo de junta (altura, espessura e coeficiente de absorção da argamassa), as curvas de absorção de água dos provetes tivessem comportamentos diferentes.

Era expectável a existência no atraso de embebição, devido à existência da uma interface com “contacto perfeito” que cria uma resistência, tal como nos demonstra a figura 25. Este atraso seria dependente da altura a que se situasse a junta.

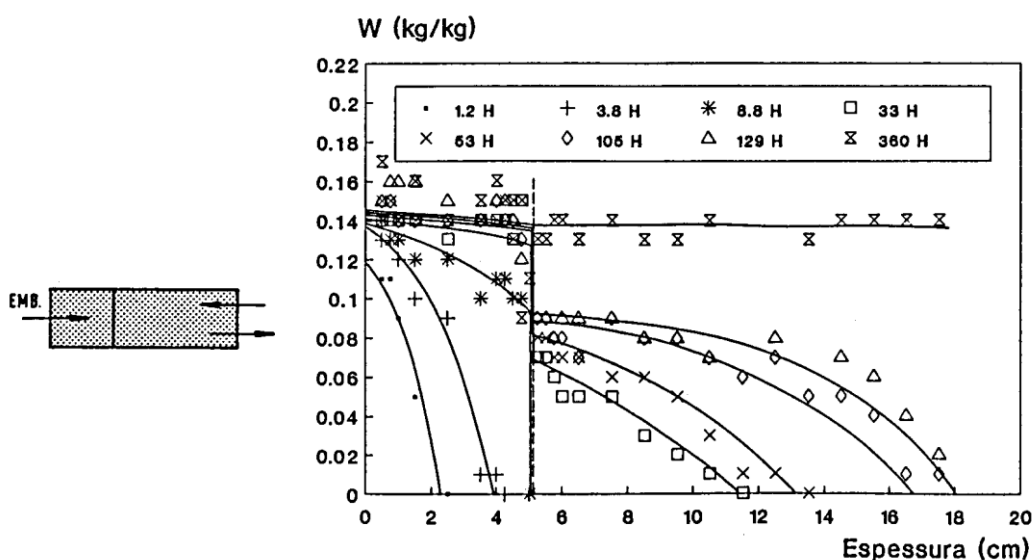


Figura 25 – Atraso na embebição de um provete com duas camadas de barro vermelho [8].

Se a interface fosse colocada a diferentes cotas do plano de humidificação, o início da desaceleração de absorção do provete ocorreria em diferentes períodos de tempo, como se pode verificar na figura 26 (cotas iguais a 2, 5 e 7).

A primeira camada ficaria rapidamente com um teor de humidade próximo da saturação enquanto que a segunda camada ficaria dependente do fluxo transmitido pela interface.

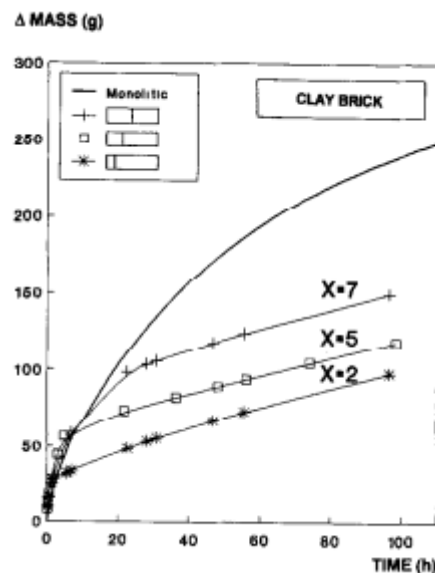


Figura 26 - Atraso na cinética de molhagem devido à interface em função da sua posição, com a camada 1 com um coeficiente de absorção maior que a camada 2 [20].

Com juntas com um coeficiente de capilaridade menor que o coeficiente de capilaridade do tijolo (caso estudado), caso a água não ultrapassasse a junta o gráfico esperado seria algo semelhante ao representado na figura 27.

Conhecidos coeficientes de absorção de água de cada uma das argamassas e do tijolo maciço também era possível prever entre que intervalo iria variar o coeficiente de capilaridade de cada um dos provetes. Era ainda expectável que juntas mais espessas e com menor coeficiente de capilaridade fossem mais impermeáveis.

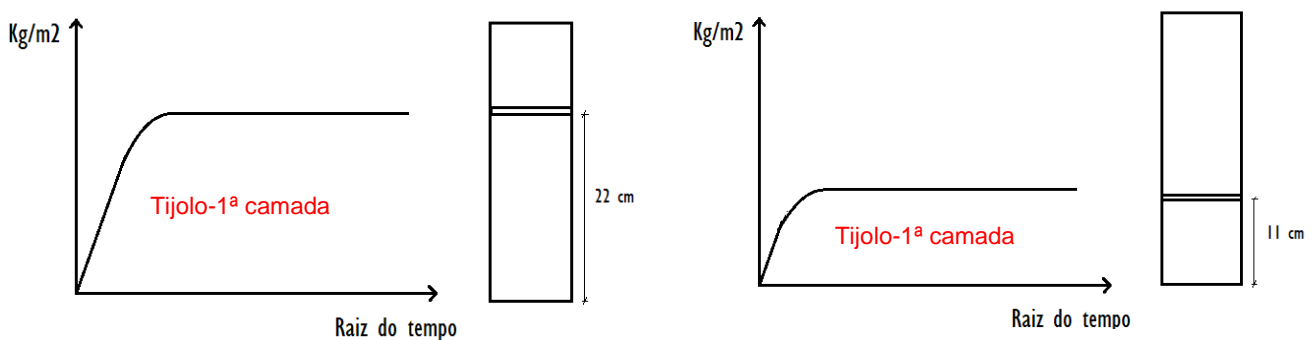


Figura 27 - Gráficos esperados caso a água não ultrapasse a junta

Caso a altura atingida pela água ultrapasse a junta, estes poderiam tomar a forma da figura 28:

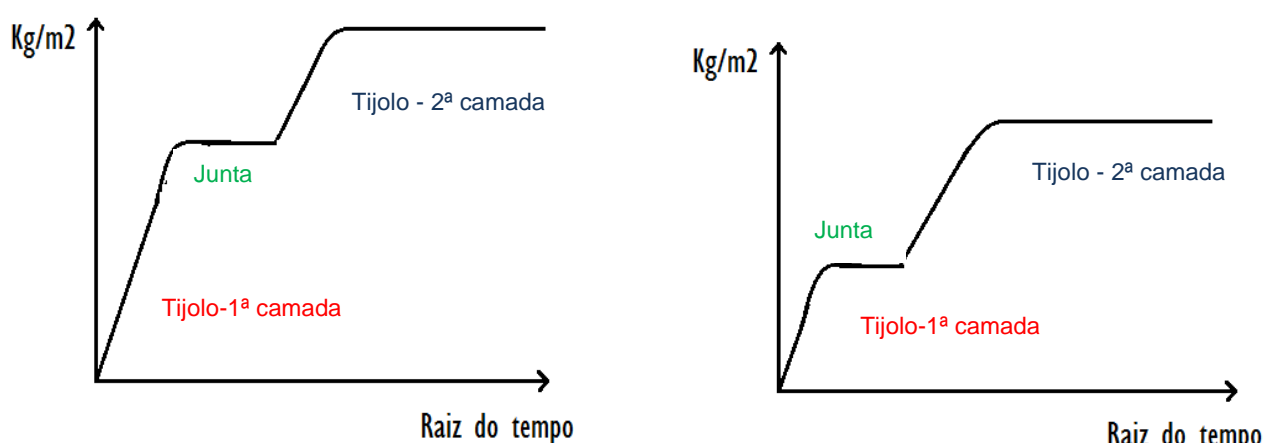


Figura 28 - Gráficos esperados caso a água ultrapasse a junta

3.3.3. RESULTADOS

Apesar de alguns resultados se confirmarem, nem todos os resultados expectáveis corresponderam aos resultados obtidos.

Os gráficos da absorção de água dos provetes monolíticos (tijolo sem juntas) apresentaram uma forma semelhante á da na figura 24. Os gráficos dos restantes provetes, apresentaram a forma da curva representada na figura 27.

Uma vez que os gráficos não obtiveram a forma da figura 28, pode dizer-se que água não ultrapassou a junta. Estes resultados podem também ser confirmados pelos resultados obtidos como o provete C', onde foi possível visualizar que a frente húmida não atingiu a totalidade da junta.

Como previsto, a estabilização do provete foi mais rápida quanto mais próxima da base se situava a junta e para diferentes provetes, obteve-se diferentes fluxos transmitidos ou seja diferentes resistências hídricas.

O coeficiente de absorção dos provetes compostos está compreendido entre o coeficiente de absorção das argamassas e os provetes monolíticos.

No entanto, não foi verificado em todos os provetes que juntas mais espessas e com menores coeficientes de capilaridade fossem mais impermeáveis. Esta incoerência com o esperado pode dever-se aos seguintes factos:

- Diferente estrutura porosa entre os provetes;
- Diferente cura das argamassas das juntas;
- Possíveis erros na construção e impermeabilização dos provetes;
- Grande semelhança entre o coeficiente de capilaridade das duas juntas quando comparado com o coeficiente de capilaridade do tijolo;

A construção de várias amostras de iguais provetes e a construção de provetes com juntas de argamassas com coeficientes de capilaridade o mais distantes possível, nomeadamente um superior e um inferior ao coeficiente de absorção do tijolo, levaria a um maior conjunto de resultados obtidos e consequentemente uma melhor análise da influência das juntas, permitindo desprezar possíveis resultados contraditórios e obter conclusões mais rigorosas.

No entanto através dos resultados obtidos pela via experimental verificou-se em maioria dos casos que as juntas realmente se podem comportar como um “impermeabilizante” impedindo ou reduzindo a embebição de água pelas paredes. De referir, que neste caso de estudo o coeficiente de absorção de água das argamassas das juntas era muito menor que o coeficiente de absorção do tijolo, pelo que se as juntas tivessem uma argamassa com um maior coeficiente de capilaridade a conclusão poderia ser inversa.

3.4. INFLUÊNCIA DA INTERFACE NA SECAGEM

Tal como no fenómeno de embebição, a interface entre camadas também influencia a secagem dos materiais. O Professor Vasco Freitas através de trabalhos experimentais constatou que provetes monolíticos saturados e colocados numa ambiência com temperatura e humidade constantes secam em três diferentes fases com diferentes velocidades de secagem (figura 29).

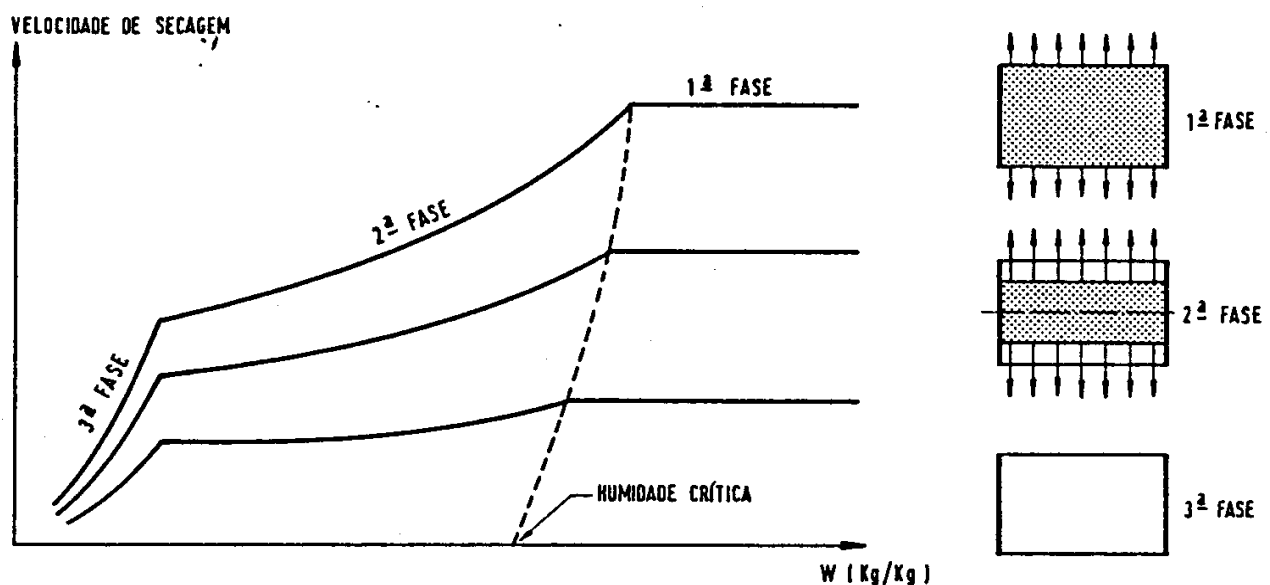


Figura 29 - Curvas características de secagem de diferentes materiais [8].

- Na primeira fase a secagem deve-se apenas as forças capilares e a humidade é constante em qualquer parte do interior do provete.
- Na segunda fase a secagem efectua-se por difusão a partir da frente húmida, diminuindo o fluxo de secagem.
- Na terceira e última fase a secagem é muito lenta, sendo a fase onde se atinge o equilíbrio higroscópico.

Também para a secagem as paredes multicamada dependem das características das paredes monolíticas (condições climatéricas do local e da natureza do material) e da resistência hídrica criada entre as camadas (quando o fluxo que atinge a interface é superior ao fluxo máximo transmitido). A resistência hídrica faz com que a secagem da camada exterior suceda mais rapidamente por falta de alimentação de água, e mais lentamente na camada inferior devido ao impedimento de evaporação.

Segundo Vasco Freitas, quando a secagem é natural, ou seja ocorre em condições higrotérmicas das ambiências, os fluxos de evaporação são menores que o fluxo máximo [8].

Através dos resultados experimentais deste trabalho seria de esperar que a interface criada pela argamassa provoca uma espécie de impermeabilização entre as camadas de tijolo não deixando a humidade e o vapor de água ascender retardando o fenómeno de secagem.

4

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA INTERFACE NA ABSORÇÃO DE ÁGUA E SECAGEM DE PAREDES SUJEITAS À HUMIDADE ASCENSIONAL

4.1. INTRODUÇÃO

Os materiais de construção são maioritariamente formados por estruturas porosas que geram trocas permanentes de humidade com o ambiente no qual estão inseridos. Esta variação do teor de água altera as características de funcionamento dos materiais de construção, nomeadamente as suas propriedades mecânicas e durabilidade.

Os estudos da transferência de humidade são um importante passo para melhor compreender como é que estes materiais reagem a esse transporte de humidade ao longo do tempo.

O ensaio de absorção de água por capilaridade permite a determinação do coeficiente de absorção de água de um material, que define a massa de água absorvida por um material quando em contacto com água, devido à actuação das forças de sucção capilar [6,25].

Neste capítulo pretende-se assim, através dos resultados de ensaios de absorção de água por capilaridade realizados em laboratório avaliar a influência das juntas no fenómeno da humidade ascensional. Para tal, foram estudados provetes de tijolo maciço com juntas construídas a diferentes alturas, com diferentes espessuras e com argamassas com coeficientes de absorção de água.

De referir que a absorção de água é influenciada pelas características dos materiais mas também pela temperatura e pela humidade relativa do ambiente a que estão sujeitos. No entanto, para simplificação dos resultados, admitiu-se que os ensaios ocorreram sempre a uma temperatura e humidade relativa constantes.

Para uniformizar o ensaio, e poder mais à frente comparar os resultados obtidos com resultados de outros autores, estes ensaios foram realizados de acordo com a norma portuguesa NP EN 1015-18, [26], com algumas modificações, designadamente no que respeita ao tempo de pesagem dos provetes, às dimensões dos provetes, à temperatura de secagem, ao tipo de recipientes de trabalho e à precisão da balança. A dimensão dos provetes foi escolhida de acordo com a oferta existente para o tijolo e a mais adequada possível para realização de juntas. Os tempos de pesagem foram ajustados ao tamanho dos provetes, e definidos de acordo com o seu comportamento ao longo dos ensaios. Os recipientes e precisão da balança utilizados foram seleccionados de acordo com os materiais e equipamentos existentes no LFC- Laboratório de Física das Construções.

Como os materiais de construção também sofrem de processos de secagem, no final dos ensaios de absorção os provetes foram submetidos a uma secagem natural, analisando-se também qual a influência das juntas no fenómeno de secagem.

O processo de secagem dos materiais é bastante complicado e lento, dependente do teor de água inicial, da distribuição inicial de água, do conteúdo de água crítico, da condutividade de vapor e das dimensões do material. O teor de água de uma dada amostra consiste no peso da água expresso em percentagem. Este pode variar entre 0 % (completamente seco) até ao valor máximo que depende da porosidade da amostra.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade e de secagem foram realizados sobre o mesmo conjunto de provetes reduzindo assim a possíveis variações devidas à heterogeneidade dos materiais, e tornando os resultados mais comparáveis entre si e com outros estudos análogos.

4.2. ENSAIO DE CAPILARIDADE

4.2.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O ensaio de absorção seguiu a norma NP EN 1015-18, pelo que foram necessários alguns dos equipamentos disponíveis no LFC da FEUP, e outros que foram adaptados às necessárias condições de trabalho.

Apresenta-se uma lista de todos os materiais utilizados no ensaio de absorção de água:

- Tabuleiro com profundidade mínima de 20 mm;
- Suportes para a colocação das amostras;
- Cronómetro;
- Balança com precisão de 0,1% da massa;
- Estufa;
- Papel aderente;
- Água;
- Material impermeabilizante;
- Pincel Diluente;
- Pano limpo e húmido.

São exigidas algumas características nos materiais utilizados, nomeadamente:

- A superfície do tabuleiro usado para a imersão dos provetes deve ser plana e suficientemente grande para uma correcta colocação das amostras;
- Os suportes devem exercer o mínimo contacto com a base do provete;
- A estufa deve ser capaz de manter uma temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- O pincel deve ser adequado para uma correcta aplicação do impermeabilizante.

Devido à continuidade das paredes os fluxos em zona corrente sujeitos a humidade ascensional, são bidireccionais. Para garantir apenas fluxos verticais os provetes foram impermeabilizados lateralmente eliminando os fluxos de humidade nessa direcção.

A impermeabilização consistiu na aplicação de uma resina epóxi bicomponente (A+B) (Icosit 101 da Sika), numa mistura homogénea de duas substâncias, componente A e componente B (figura 30). A resina foi preparada pela mistura homogénea das duas substâncias, A e B, em que para cada 10g de

resina se misturaram 7,9g do componente A e 2,1g do componente B. Em anexo é possível consultar a ficha técnica de cada um destes componentes.



Figura 30 - Componente A e componente B

As amostras ensaiadas foram construídas no laboratório por provetes prismáticos de tijolo maciço interligados por uma junta de argamassa. Foram ainda necessários os seguintes materiais e equipamentos para a elaboração dos provetes:

- Espátula;
- Esponja húmida para limpar provetes;
- Água;
- Copo de medição de líquidos;
- Argamassa tipo 1;
- Argamassa tipo 2;
- 10 Tijolos maciços com as dimensões 5,5x5,5x11 [cm];
- 10 Tijolos maciços com as dimensões 5,5x5,5x22 [cm].

Os produtos cerâmicos têm uma grande variedade conforme a origem, a matéria-prima, o processo de fabricação e a sua finalidade.

O tijolo maciço pode ser usado com fins estruturais ou como alvenarias de preenchimento ou decorativa. O tijolo usado neste trabalho experimental é um tijolo utilizado nas fachadas como forma decorativa, pelo que sofreu durante o seu processo de fabrico um processo de cozedura a altas temperaturas provocando a diminuição da sua porosidade, sendo então de esperar que o seu coeficiente de absorção seja menor do que dos tijolos maciços comuns [2,8,12].

As duas argamassas aplicadas (figura 31), foram preparadas de acordo com a ficha técnica em anexo.

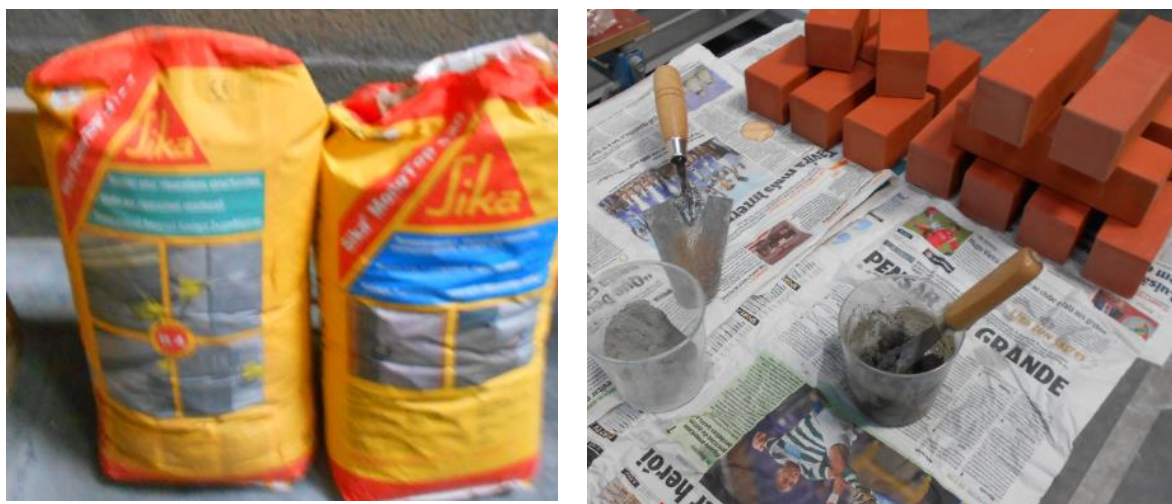


Figura 31 - Materiais utilizados.

A tabela 6 refere algumas das características importantes das argamassas para a realização dos ensaios:

Tabela 6 - Características das argamassas

	Argamassa 1 (Sika® MonoTop® 412 S)	Argamassa 2 (Sika® MonoTop®-620)
Massa volúmica kg/dm ³	2,05	2,02
Granulometria (Dmax) mm	2,0	0-0,7
Absorção capilar (aprox) Kg/m ² *s ^{0,5}	0,00117	0,00667
Base química	Mistura de cimento resistente a sulfatos, agregados seleccionados e aditivos.	Argamassa de cimento melhorada com resinas sintéticas e fumo de sílica.
Secagem térmica (EN 13687-4) N/m ² (MPa)	2,3	-

4.2.2. CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram construídas no LFC da FEUP a partir de tijolos maciços com 11cm e 22cm de comprimento ligados por juntas de argamassa (figura 32). As juntas de união dos tijolos maciços variam na espessura (1cm ou 2 cm) e no tipo de argamassa (diferentes coeficientes de absorção de água).



Figura 32 - Construção dos provetes

A construção dos provetes foi uma das etapas mais importante deste trabalho, uma vez que foi a partir destes que se pôde realizar os ensaios e provetes mal construídos implicam resultados e conclusões incorrectas.

Para a construção destes começou-se por preparar as argamassas, misturando as quantidade de solvente e solúvel de acordo com as suas fichas técnica, mexendo bem até adquirir uma pasta homogénea. Depois de preparadas as argamassas, os provetes foram humidificados na sua base com a ajuda de uma esponja para garantir uma melhor aderência da junta, e de seguida foi colocada a argamassa nessa base humedecida com a ajuda de uma espátula e colher de trolha. Com esses dois utensílios e um molde construído em papelão a argamassa foi moldada á área útil da base do provete como se pode observar na figura 20 e 21, medindo a altura da junta com a ajuda de uma régua. As alturas medidas dependeram da altura final que se pretendia obter na junta. Depois de medida a junta foi colocada a terceira e última camada do provete, o segundo tijolo, humedecido também na base de contacto da argamassa.

Finalmente os provetes ficaram a repousar cerca de 1/2h (figura 33), e depois com cuidado foram limpos lateralmente com a ajuda de uma esponja (figura 32).



Figura 33 – Provetes construídos e molde utilizado

A tabela 7 indica a denominação e características de cada um dos provetes construídos, ilustrados na figura 34.

Tabela 7 - Caracterização dos provetes de ensaio

Designação	Constituição	Argamassa	Espessura da junta (cm)	Altura tijolo 1ªcamada (cm)	Altura tijolo 3ªcamada (cm)
A	Monolítico	-	-	22	-
A'	Monolítico	-	-	11	-
B	3 Camadas	1	1	22	11
C	3 Camadas	1	1	11	22
D	3 Camadas	1	2	11	22
E	3 Camadas	1	2	22	11
F	3 Camadas	2	1	11	22
G	3 Camadas	2	1	22	11
H	3 Camadas	2	2	11	22
I	3 Camadas	2	2	22	11
C'	3 Camadas	1	1	11	22

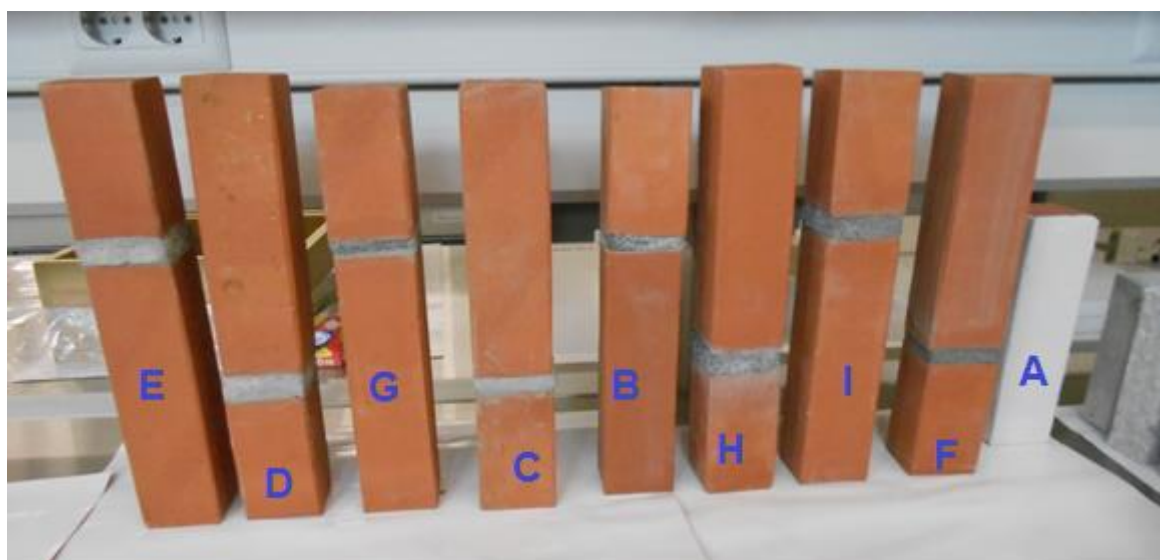


Figura 34 - Provetes construídos

Os provetes depois de construídos secaram a temperatura ambiente cerca de 7 dias. Posteriormente todos os provetes excepto provete C' sofreram um processo de impermeabilização nas quatro faces laterais, com uma demão no sentido horizontal e outra demão no sentido vertical, com um tempo de secagem entre demãos de 24h, tal como sugerido pelos especialistas do LNEC [5].

Os provetes foram postos a secar inclinados para impedir o escoamento do impermeabilizante para as faces superiores e inferiores, como demonstrado na figura 35.



Figura 35 – impermeabilização dos provetes.

Depois da secagem superficial do impermeabilizante as amostras foram colocadas na estufa, figura 36, até obterem a massa constante (atingida, quando a diferença de massa entre duas pesagens sucessivas, efectuadas com um intervalo de (24 ± 2) horas, não for superior a 0,1% da massa do provete seco).



Figura 36 - Provetes a secar na estufa.

Na tabela 8 registam-se as massas de cada um dos provetes nas várias fases, antes da impermeabilização, depois de impermeabilizar e no início do ensaio.

Inicialmente não estava previsto a construção do provete C', no entanto devido ao facto dos provetes estarem impermeabilizados com a resina epóxi não era possível medir a altura da ascensão capilar no final do ensaio de absorção, pelo que se recorreu à construção de um provete não impermeabilizado, o provete C'. Este provete tem as mesmas características do provete C sem impermeabilizante.

Tabela 8- Massa dos provetes ao longo do ensaio.

Designação	Massa dos provetes		
	Antes impermeabilizar (g)	Depois de impermeabilizar (g)	Antes de iniciar o ensaio
A	1647,6	1677,8	1633,8
A'	780,8	798,8	786,7
B	2464	2508,8	2492,6
C	2401,7	2458,6	2449,6
D	2437,3	2512,2	2500,2
E	2409,5	2472,1	2460,0
F	2402,1	2439,8	2432,8
G	2357,4	2407,4	2393,2
H	2476,9	2532,1	2522,0
I	2492,8	2546,3	2535,8
C'	-	-	2504,7

4.2.3. PROCEDIMENTO

O ensaio experimental do coeficiente de capilaridade, também conhecido por coeficiente de absorção, baseia-se na colocação de provetes em contacto com a água registando o seu aumento de massa em função da raiz quadrada do tempo.

Simplificadamente o ensaio de cada um dos provetes seguiu os seguintes passos:

1. Fixou-se os suportes (pionés) no tabuleiro colando-os com fita-cola, (figura 37);
2. Verteu-se a água no tabuleiro de modo que os provetes ficassem cerca de 5mm imersos;
3. Mergulhou-se os provetes inclinadamente (evitando bolhas de água);
4. Cobriu-se a tina para evitar a evaporação das amostras molhadas;
5. Activou-se o cronómetro e removeu-se o provete do tabuleiro após 1min limpando rapidamente a água da superfície com um pano humedecido;
6. Pesou-se o provete e voltou-se a colocar imediatamente no tabuleiro;
7. Repetiu-se o mesmo procedimento para os tempos 1, 2, 3,4 ,5 , 10, 15, 30, 60, 120, 460, 1440, 2880.... minutos, até as amostras estabilizarem, tendo o cuidado para que o nível da água permanecesse constante durante todo o ensaio (figura 38);

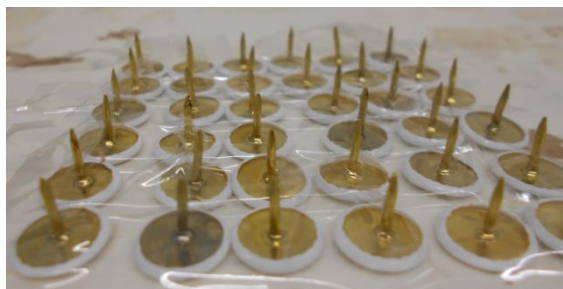


Figura 37 - Suporte feito em pionés



Figura 38 - Ensaios a decorrer

Os tempos de pesagem foram adaptados ao procedimento No. II.6 —*Water absorption coefficient (capillarity)*], do RILEM [28] e ao comportamento dos provetes ao longo do ensaio. As adaptações feitas consistiram em acrescentar tempos de pesagem, uma vez que esta norma é indicada para provetes com dimensões muito inferiores aos dos provetes utilizados neste trabalho.

Com os valores obtidos dos ensaios é possível a construção de um gráfico com um comportamento semelhante ao da figura 39, que expressa a quantidade de água absorvida por unidade de área da base de cada provete (em ordenadas [kg/m^2]), em função da raiz quadrada do tempo decorrido (em abcissas). A inclinação do primeiro troço linear da curva corresponde ao coeficiente de capilaridade (em gramas por metro quadrado pela raiz quadrada do tempo em segundos) [5].

Para uma melhor aproximação, o declive foi determinado através da recta de regressão linear, para os primeiros 5 pontos da curva obtendo-se assim valores de R^2 (coeficiente de correlação) próximos de 1. Quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 , melhor é a relação das variáveis, isto é, maior rigor terá o ajuste da recta linear à curva de absorção de água por capilaridade.

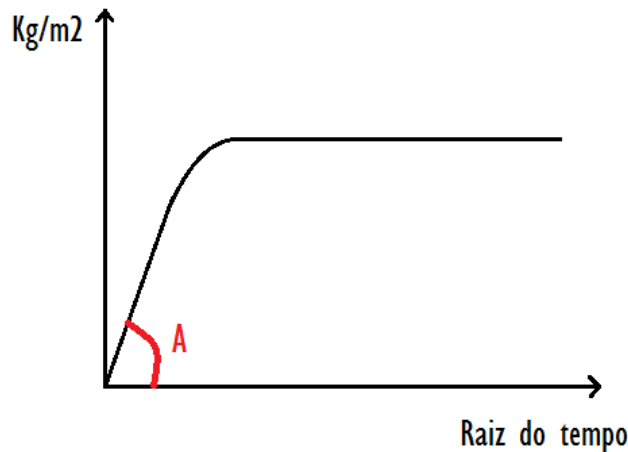


Figura 39 - Determinação do coeficiente de absorção

A absorção de água dos provetes é determinada pela diferença entre a massa do provete seco e a massa do provete ao longo do tempo, por unidade de superfície. A absorção correspondente a cada um dos tempos foi então calculada pela equação 8:

$$M_i = \frac{(m_i - M_o)}{S} \quad (8)$$

Em que:

M_i – absorção de água do provete para o tempo t_i [kg/m^2]

m_i – massa do provete para o tempo t_i [kg]

M_o – massa do provete no início do ensaio (seco) [kg]

S – área da base do provete que está em contacto com a água [m^2]

Neste ensaio, apenas foi possível a medição da altura ascensão capilar (H) para o provete C', realizada logo após o final do ensaio de absorção de água. Nos restantes não foi possível tal medição devido ao impermeabilizante aplicado nas laterais dos provetes que impedia a visualização a olho nu e a aplicação de outro tipo de aparelhos de medição.

A altura da ascensão capilar seria um importante parâmetro para avaliar a influência da junta no fenómeno da absorção de água, percebendo ao longo do tempo onde se encontrava a frente húmida dos provetes. Assim esta análise apenas será feita para o provete C'.

4.2.4. RESULTADOS OBTIDOS

A determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes baseou-se na medição do peso dos provetes parcialmente imersos ao longo do tempo. Os resultados são apresentados graficamente, pelas curvas de quantidade de água absorvida em função da raiz quadrada do tempo e determinados coeficientes de absorção de água.

Para que os provetes pudessem ser comparados, considerou-se que tiveram as mesmas condições de cura, secagem, impermeabilização e absorção de água.

Análise dos provetes monolíticos (sem juntas):

O gráfico 1 apresenta a cinética de absorção de água por capilaridade registada no provete monolítico A e provete monolítico A' ao longo dos 8 dias de ensaio.

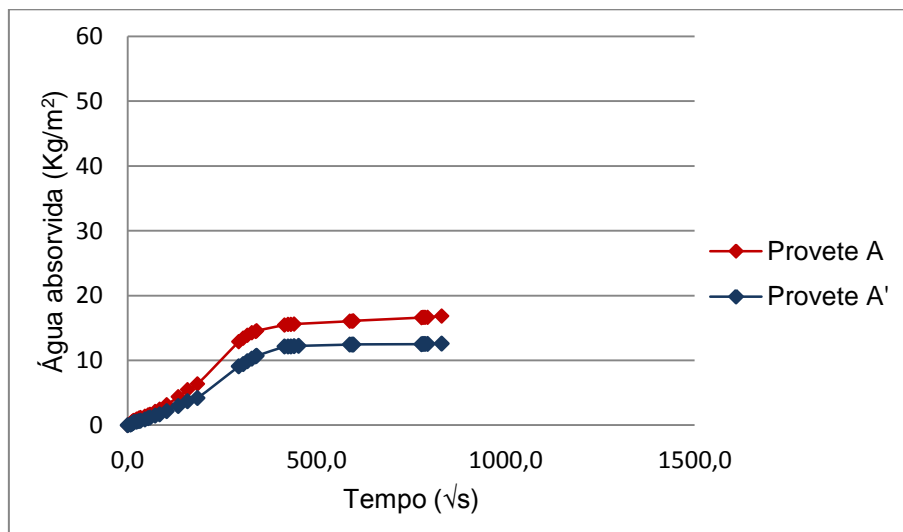


Gráfico 1 - Variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete A e provete A'

Da análise do gráfico 1 conclui-se que o provete A (proвете mais alto) absorveu uma maior quantidade de água do que o provete A', apesar de demorarem sensivelmente o mesmo tempo a estabilizar. Verifica-se que a altura do tijolo influencia significativamente a quantidade de água absorvida e consequentemente o respectivo coeficiente de absorção como é visível no gráfico 2, onde se apresenta o cálculo do coeficiente de absorção de água por capilaridade de cada um dos provetes ($A \approx 0,0461 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$ e $A' \approx 0,0388 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$).

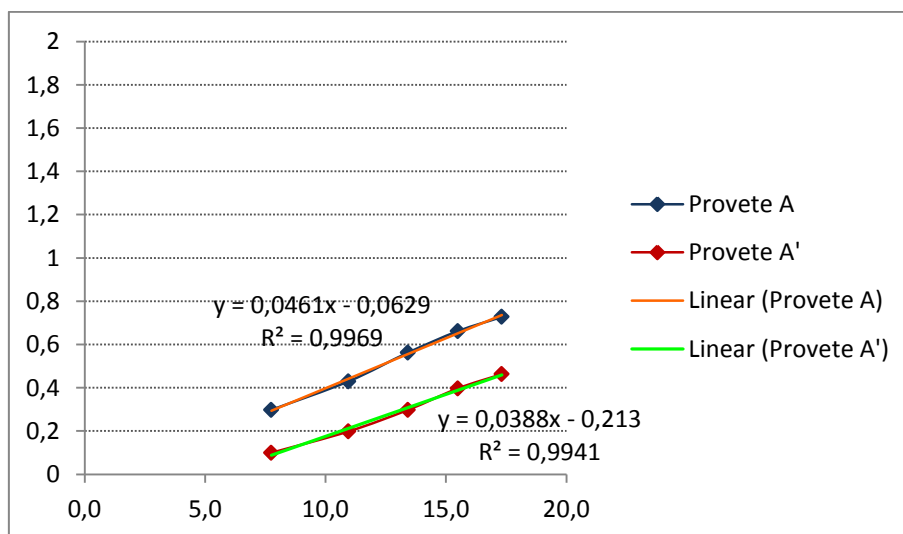


Gráfico 2 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade do provete A e do provete A'

Influência da altura da junta

Analisando os gráficos 3 a 6 pode-se comparar e perceber qual a influência da altura da junta no fenómeno da humidade ascensional. Para tal foram analisados 4 provetes, 2 provetes com argamassa tipo 1 e 2 provetes com argamassa tipo 2. Os gráficos 3 e 4 referem-se aos provetes de argamassa tipo 1 (B, C, D e E) e os gráficos 5 e 6 aos provetes de argamassa tipo 2 (F, G, H, I).

Nos gráficos 3 e 5 estão representados provetes com juntas de argamassa com 1cm de espessura e nos gráficos 4 e 6 estão representados provetes com juntas de argamassa com 2cm de espessura. Assim cada um dos gráficos tem como variante a altura a que a junta se situa. Sendo que, nos provetes B, E, G e I a junta se situa a 22cm da base e nos provetes C, D, F e H a junta se situa a 11cm da base.

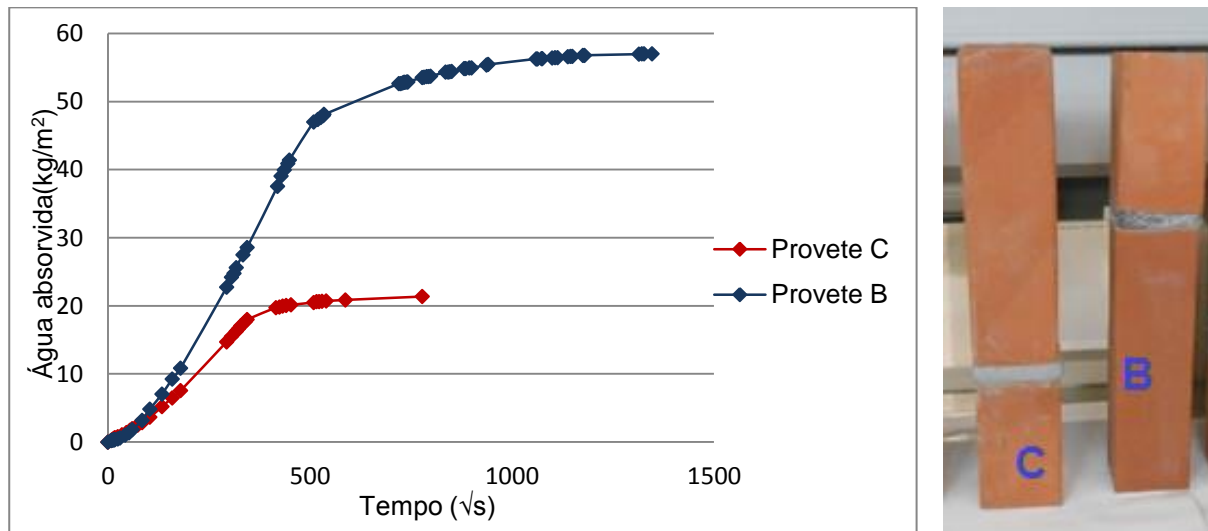


Gráfico 3 - Variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete B e do provete C (argamassa 1 e espessura 1cm).

Analisando os gráficos 3, 4, e 6 verifica-se que inicialmente os provetes têm comportamentos muito semelhantes, sendo que ao longo do tempo ocorre uma diferença significativa na variação da massa. Tal não acontece para o gráfico 5 onde os dois provetes (G e F) apresentam um comportamento diferente desde o início do ensaio.

Em todos os gráficos é visível que a generalidade dos provetes com uma junta situada a 22cm da base, representados pela linha azul, apresentam maior quantidade de água absorvida. Confirma-se então que a altura a que se situa a junta é um factor preponderante na absorção da água. Para provetes em que a junta está mais próxima da base a quantidade de água absorvida é menor e a estabilização é mais rápida.

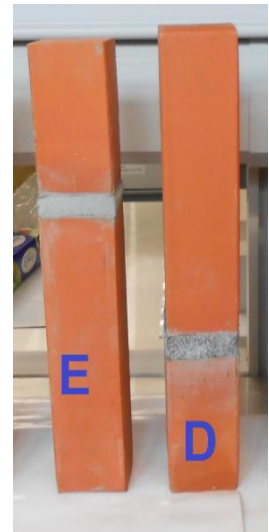
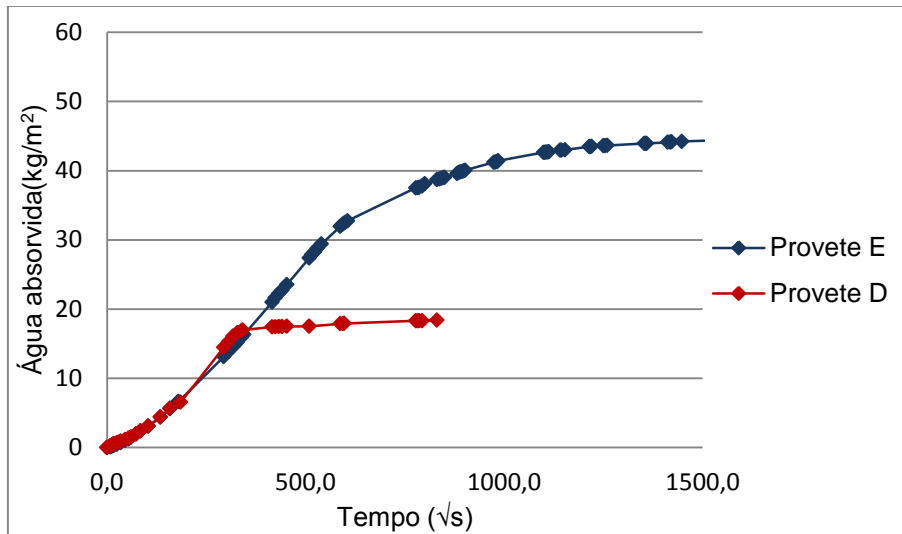


Gráfico 4 - Variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete D e do provete E (argamassa 1 e espessura 2cm).

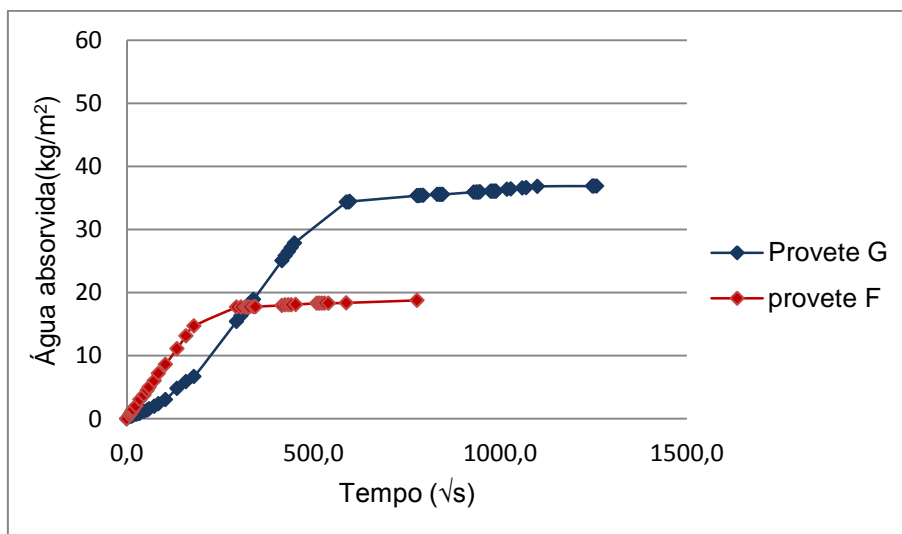


Gráfico 5 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete G e F (argamassa 2, e espessura 1cm).

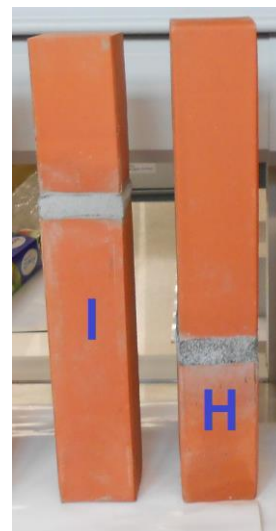
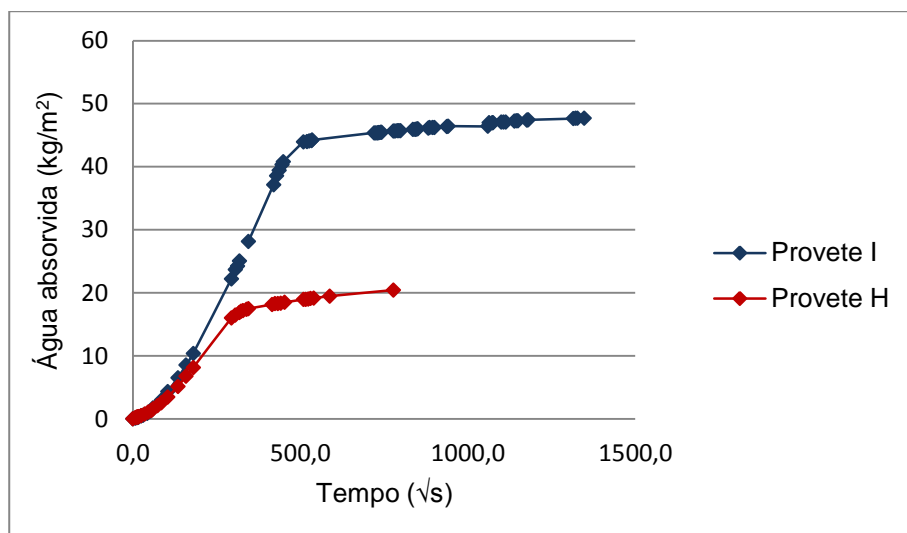


Gráfico 6 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete H e I (argamassa 2, e espessura 2cm).

Analisando os gráficos 7 a 10, que representam o coeficiente de absorção de água dos provetes verifica-se que os provetes B, E, G, I (representados graficamente pela linha azul) possuem uma menor inclinação da curva de absorção, isto é, um menor coeficiente de absorção.

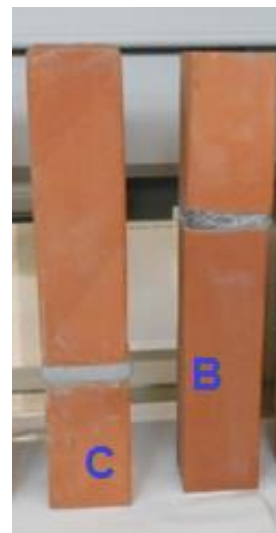
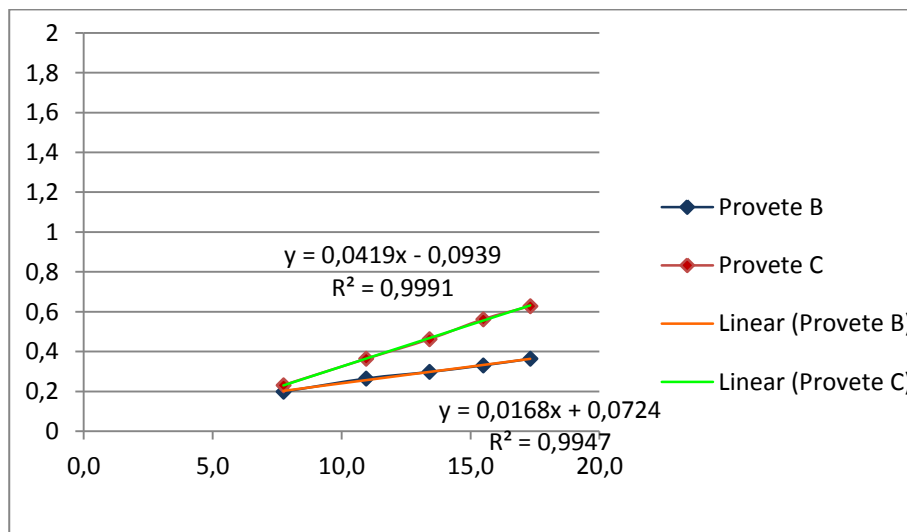


Gráfico 7 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes B e C.

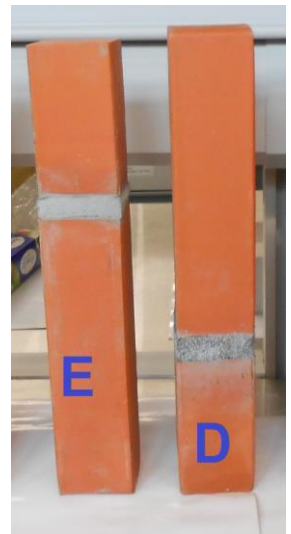
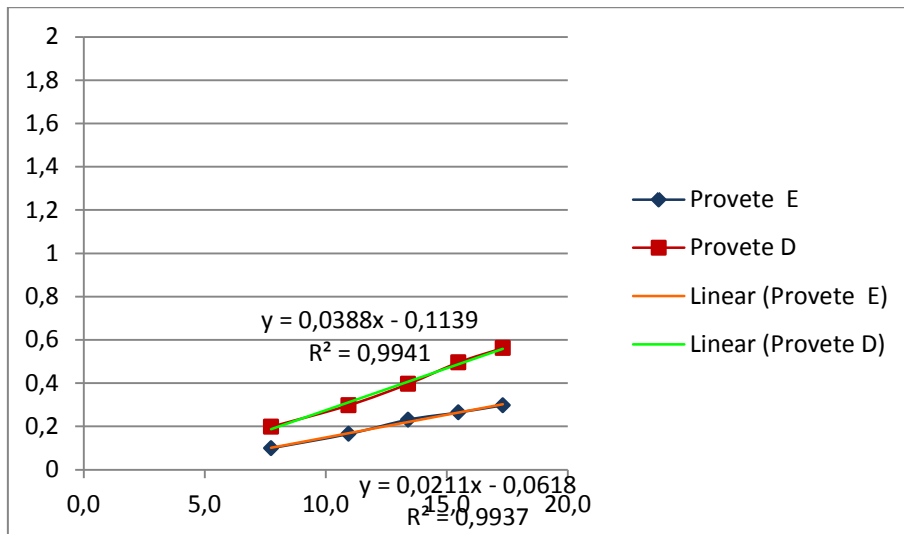


Gráfico 8 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes D e E.

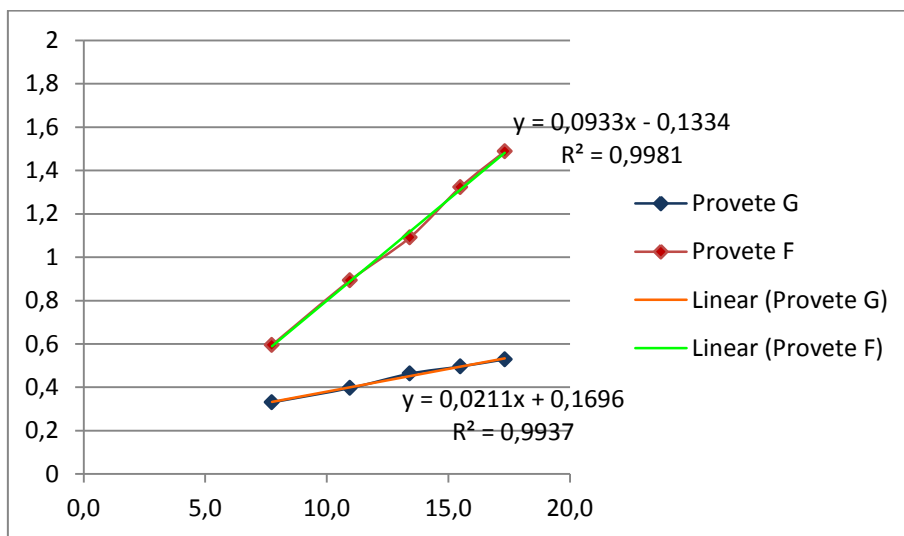
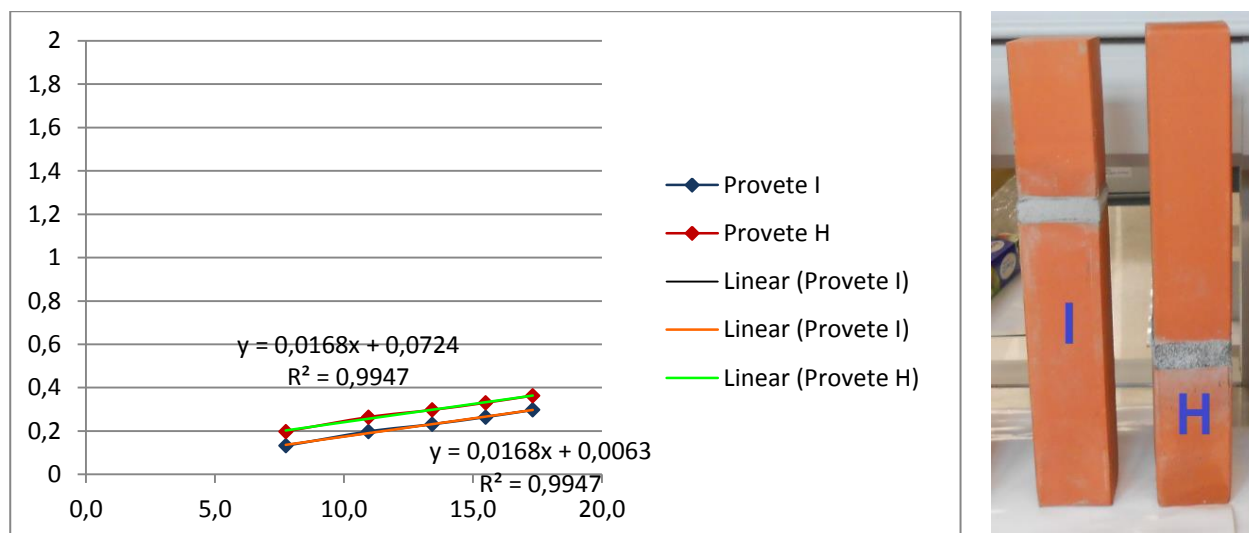


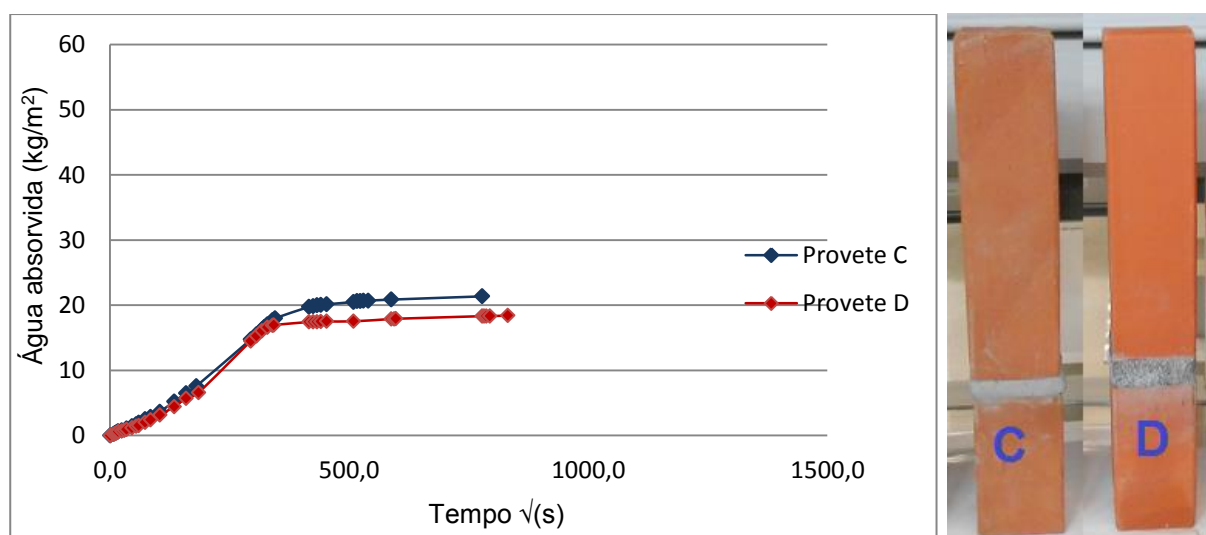
Gráfico 9 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes G e F.



Influência da espessura da junta

Nos gráficos 11 a 14 é possível avaliar a influência da espessura da junta, uma vez que os provetes apresentados são análogos variando somente a espessura da junta (junta com 1cm ou 2cm).

Os gráficos 11 e 12 referem-se a provetes com a junta situada a 11cm da base (C, D, F e H) e os gráficos 13 e 14 a provetes com a junta distanciada de 22cm da base (B, E, G e I).



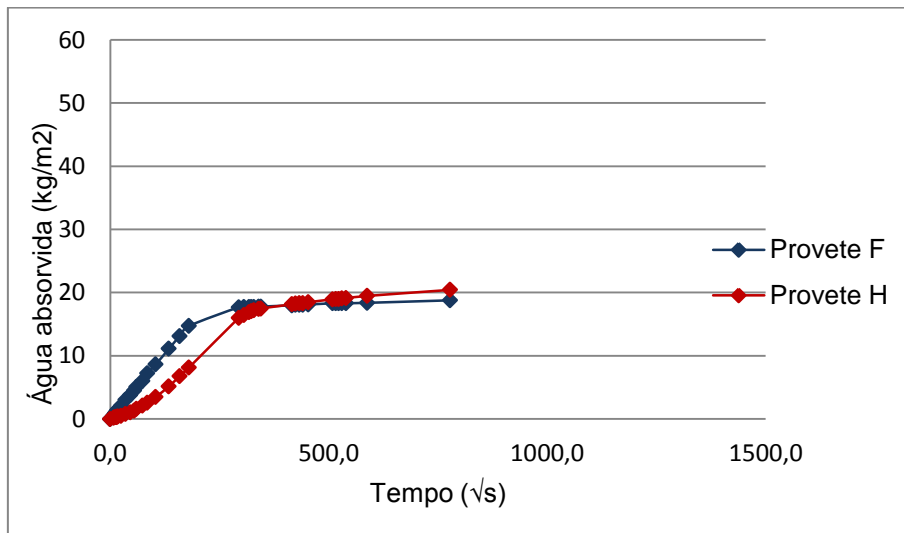


Gráfico 12 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete H e F (argamassa 2, e altura da base de 11cm).

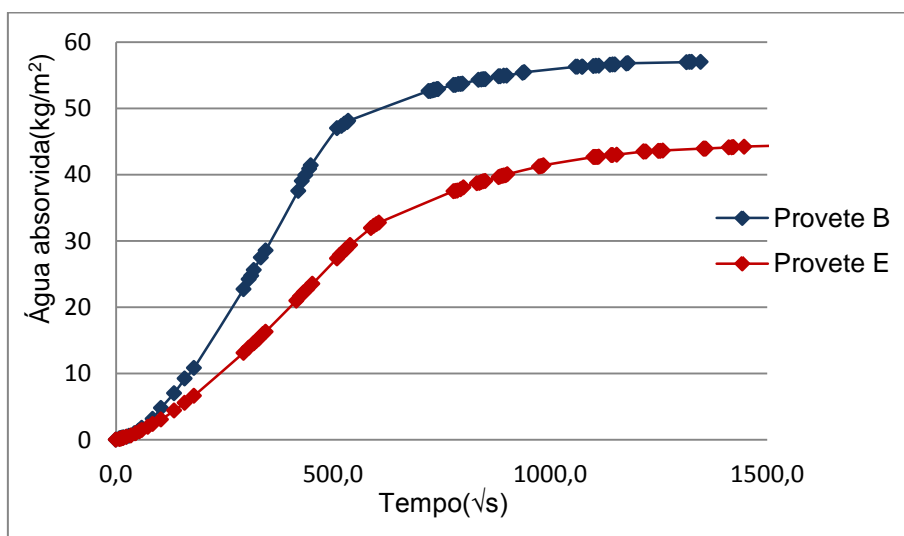


Gráfico 13 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete B e E (argamassa 2, e altura da base de 11cm).

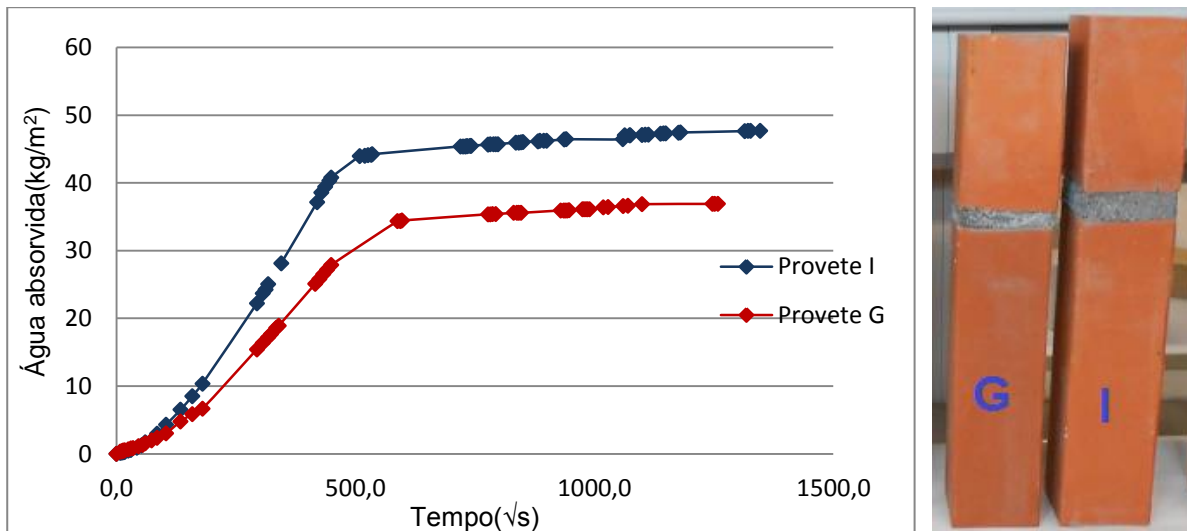


Gráfico 14 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete G e I (argamassa 2, e altura da base de 11cm).

Analisando os gráficos 11 a 14 verifica-se que a espessura da junta pode influenciar a capilaridade. Nos gráficos 11, 13 e 14 as curvas de absorção têm comportamento semelhante no início do ensaio, afastando-se ao longo do tempo. No gráfico 12 os provetes não têm um comportamento semelhante.

Estes gráficos referem-se a dois provetes similares duplicando apenas a espessura da junta de 1cm provete (C, B, G e F) para 2cm (provete D, E, H e I). Nos gráficos 11 e 13 verifica-se que a espessura da junta influenciou expressivamente a quantidade de água absorvida. A quantidade de água absorvida é maior para os provetes com 1cm de espessura. No gráfico 14 (provete G e I) verifica-se o oposto, ou seja o provete com maior espessura absorveu mais água.

Nos gráficos de 15 a 18, os provetes com 1cm de espessura têm um maior coeficiente de absorção de água. Este era um comportamento esperado, uma vez que é compreensível que uma junta com a espessura de 1cm seja menos impermeável que uma junta igual mas com o dobro da espessura.

No gráfico 18, o provete com 2cm (provete G) de espessura tem um maior coeficiente de absorção. Este não era um resultado esperado, uma vez que a junta de 2cm deveria oferecer uma maior resistência à água.

Esta não conformidade de resultados pode ser explicada pelo facto de os provetes terem uma diferente estrutura porosa, pelo facto de terem sido construídos e ensaiados em diferentes alturas, terem tido diferentes condições de cura da argamassa da junta, ou até mesmo por erros na construção e impermeabilização destes.

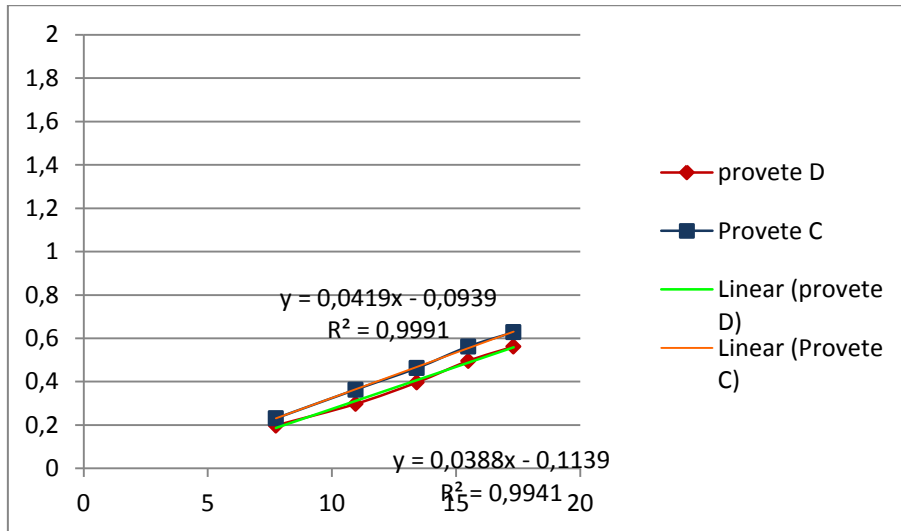


Gráfico 15 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes C e D.

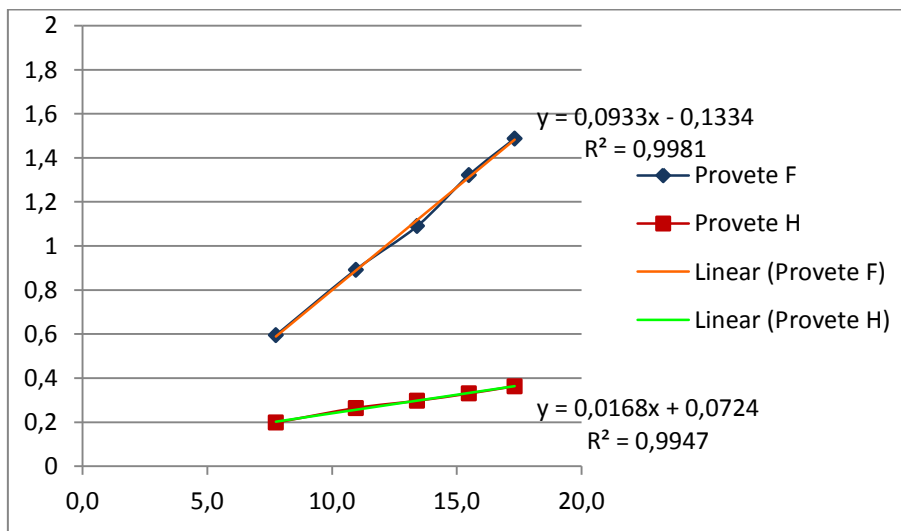


Gráfico 16 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes F e H.

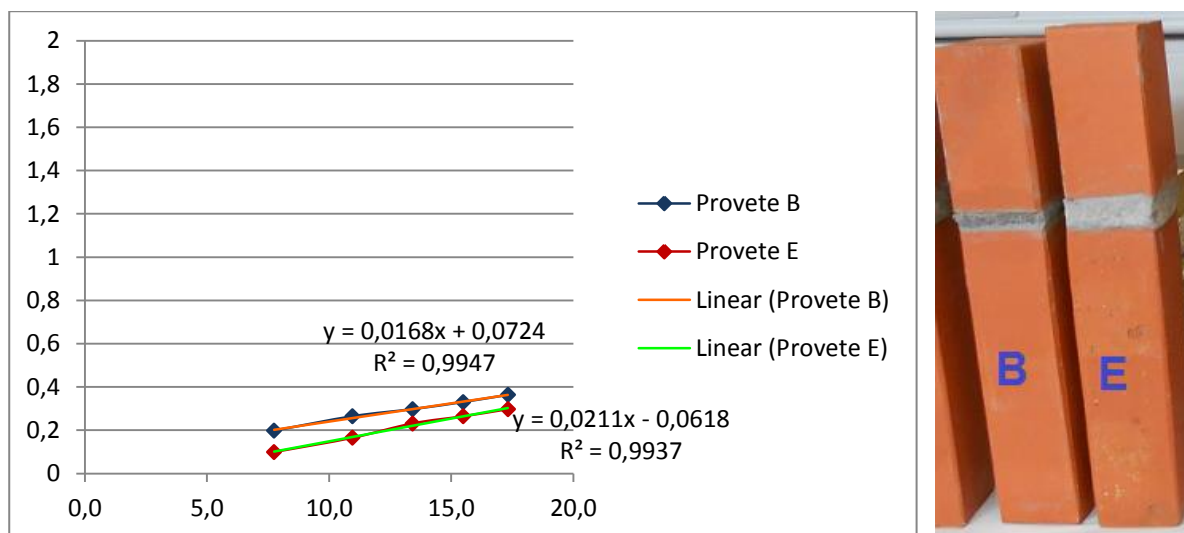


Gráfico 17 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes B e E.

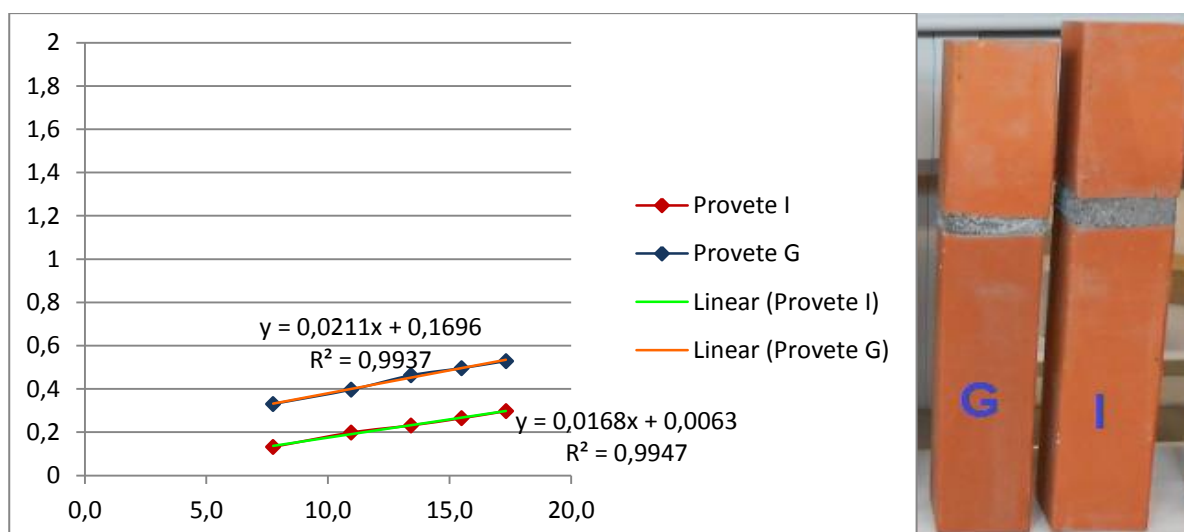


Gráfico 18 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes G e F.

Tipo de argamassa da junta

Nos gráficos de 19 a 21 estão representados provetes com as mesmas características diferindo apenas no tipo de argamassa. Os provetes F, G, H e I são provetes com juntas da argamassa 2 (curvas de absorção de cor azul) e os provetes C, B, D, E são provetes com juntas de argamassa 1 (curvas de absorção de cor vermelha). Analisando estes gráficos pode-se avaliar a influência da argamassa utilizada na junta na absorção de água por capilaridade.

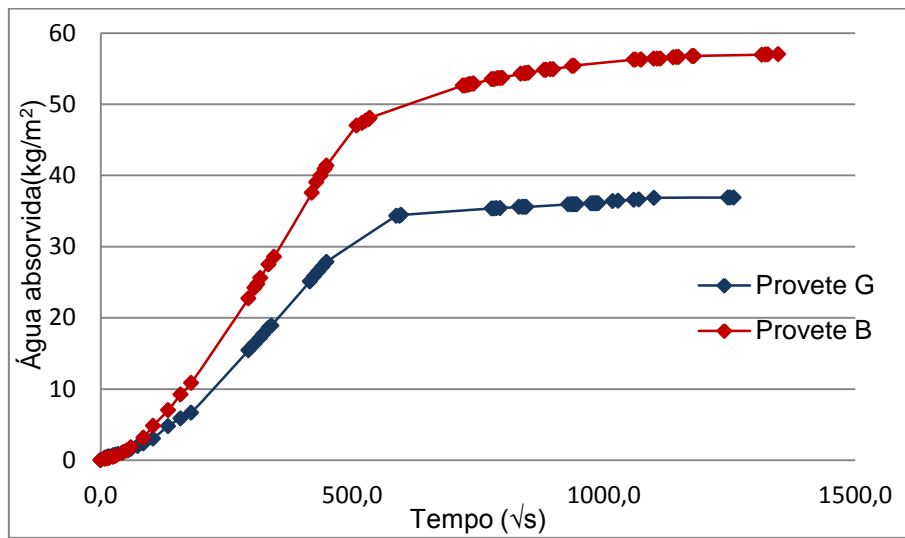


Gráfico 19 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete G e B (argamassa 2, argamassa 1).

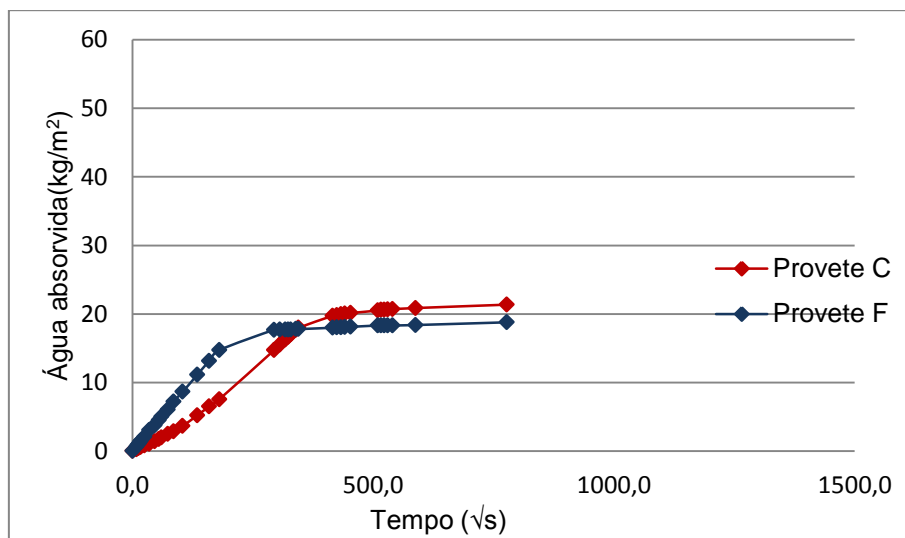


Gráfico 20 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete C e F (argamassa 1, argamassa 2).

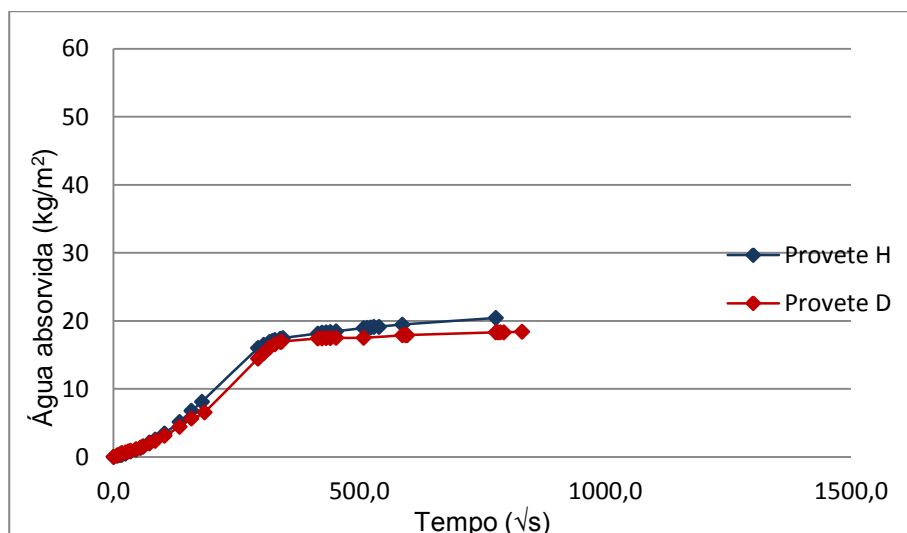


Gráfico 21 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete D e H (argamassa 2, argamassa 1).

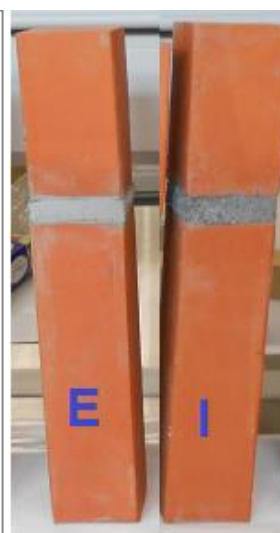
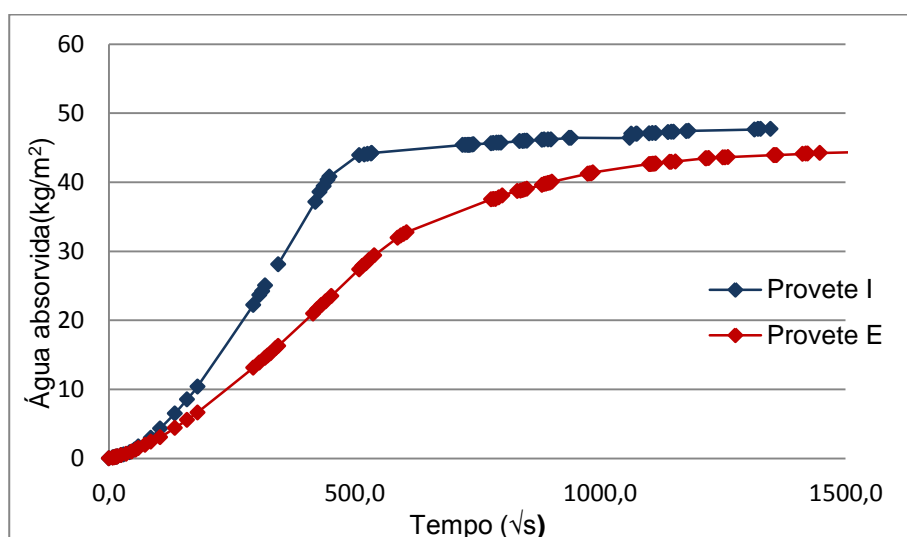


Gráfico 22 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete E e I (argamassa 1, argamassa 2).

Observando os gráficos 19, 21 e 22, verifica-se novamente que todos os provetes têm um comportamento semelhante no início do ensaio, diferenciando-se apenas após alguns dias. Tal não se sucede no gráfico 20, no qual o comportamento dos provetes se diferencia logo no início do ensaio.

Confrontando-se os resultados obtidos verifica-se que o tipo de argamassa não influencia claramente a absorção de água dos provetes. Só no gráfico 19 é que existe uma grande diferença entre as quantidades de água absorvida dos dois provetes, sendo que nos restantes gráficos a quantidade de água absorvida é muito similar.

Nos gráficos 19, 20 e 22, verifica-se que os provetes com juntas da argamassa 1 absorveram maiores quantidades de água, resultados compreensíveis, uma vez que a argamassa 1 possui um maior coeficiente de absorção de água, absorvendo naturalmente maiores quantidades de água.

No gráfico 21, o provete com junta da argamassa 2 absorveu uma maior quantidade de água. Esta incoerência de resultados pode justificada pelo facto de o coeficiente de absorção das duas argamassas ser muito semelhante quando comparado com o coeficiente de absorção do tijolo e ainda pelas diferentes condições de cura da argamassa, pelas diferenças da estrutura porosa entre os provetes, por diferentes condições de ensaio, e por má construção ou impermeabilização dos provetes.

Relativamente à duração dos ensaios (tempo de estabilização), verifica-se que os provetes da argamassa 1 demoraram mais tempo a estabilizar, excepto no gráfico 21, em que os provetes demoraram aproximadamente o mesmo tempo.

Analisando os coeficientes de absorção de água de cada um dos provetes representados nos gráficos de 23 a 26 verifica-se que os provetes que absorveram maiores quantidades de água apresentam um menor coeficiente de absorção. No gráfico 19 e 20 os provetes com juntas de argamassa 2 apresentam um maior coeficiente de absorção e nos gráficos 21 e 22 o maior coeficiente de absorção pertence aos provetes de argamassa 1.

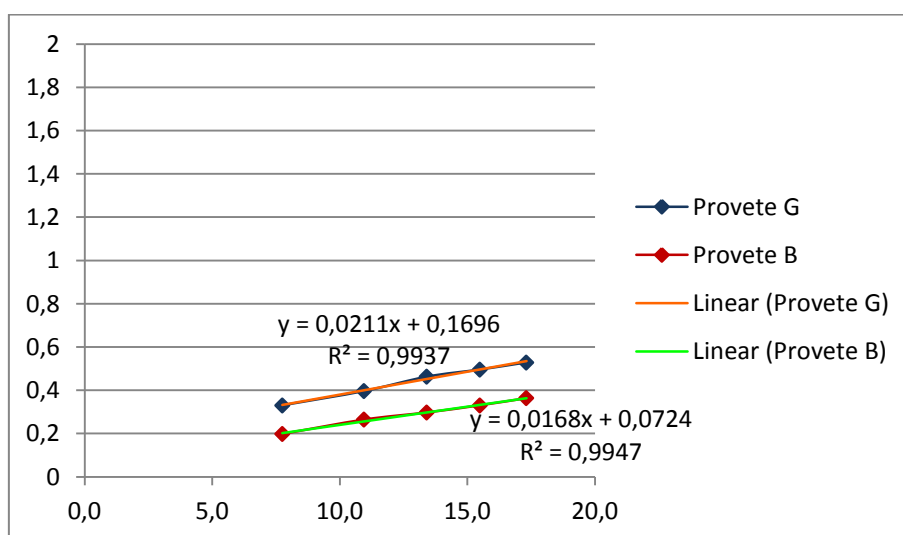


Gráfico 23 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes G e B

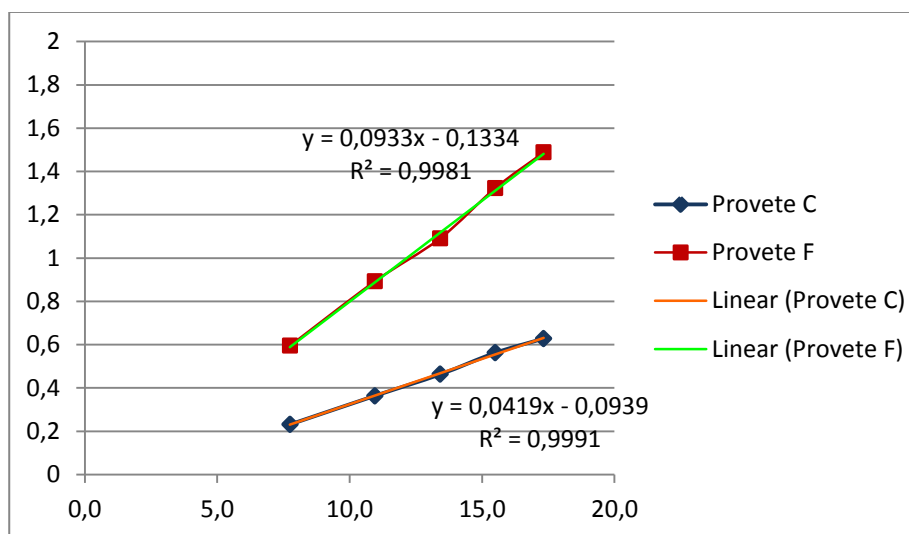


Gráfico 24 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes C e F

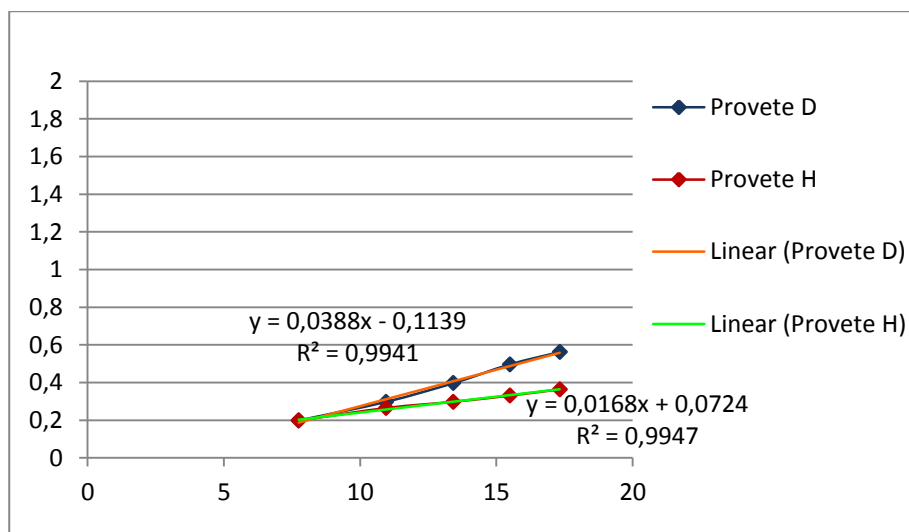


Gráfico 25 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes D e H

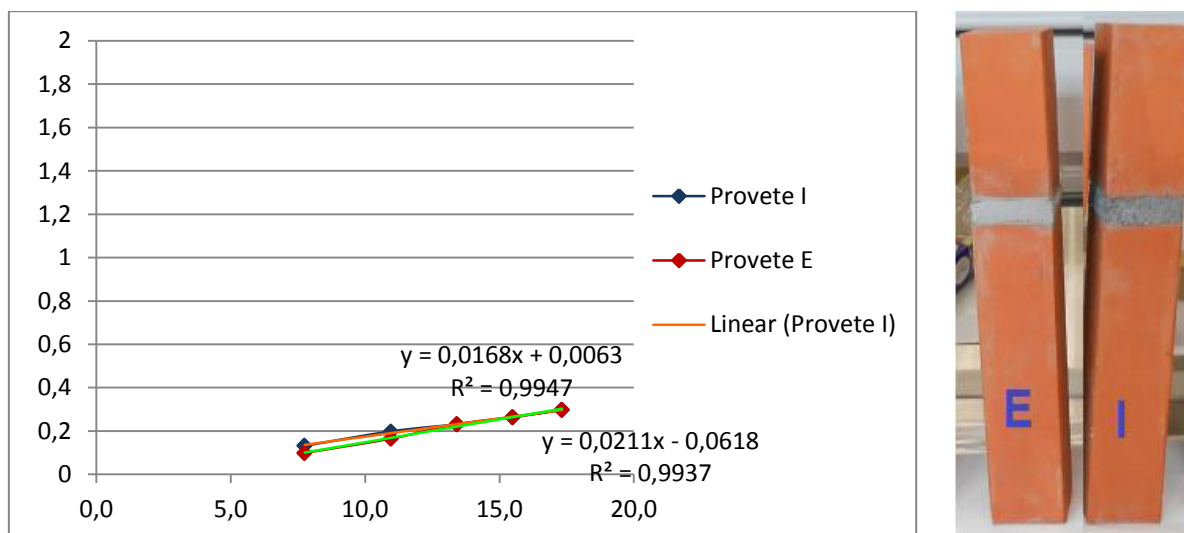


Gráfico 26 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos provetes E e I

Provete C/C' com e sem impermeabilizantes

No gráfico 27, encontram-se representados os provetes C e C', provete impermeabilizado e provete não impermeabilizado. Analisando este gráfico, verifica-se que o comportamento de ambos é muito semelhante durante todo o ensaio.

Determinado o coeficiente de absorção destes dois provetes, verificando-se que o provete C' tem um maior coeficiente de absorção de água (tabela 9). Tal já era previsível uma vez que o provete C' não se encontrava impermeabilizado, pelo que a área de contacto entre o provete e a água é superior (área da base do provete + área 5mm laterais do provete imerso na água).

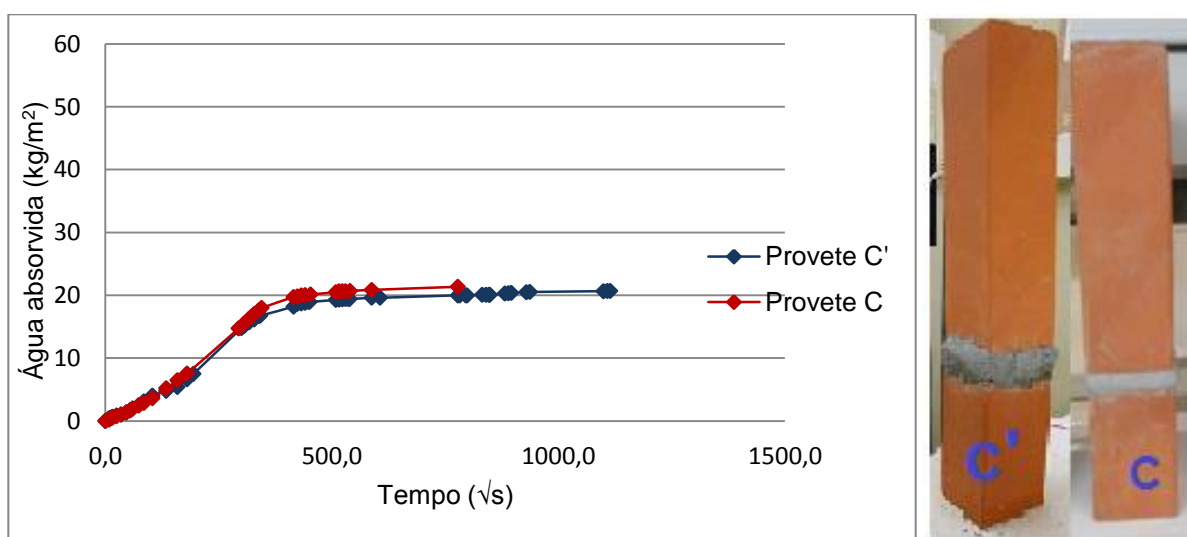


Gráfico 27 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete C e C' (com impermeabilizante, sem impermeabilizante).

A decisão de realizar este ensaio, deve-se ao facto de os provetes com impermeabilizante não permitirem a visualização e a determinação da altura atingida pela frente húmida. No entanto, devido às características do tijolo utilizado, a análise da ascensão capilar só foi possível quando esta atingiu a junta (figura 28).

Contudo, através da análise da área molhada da junta foi possível verificar que a frente húmida não ultrapassou a junta do provete, uma vez que esta nunca chegou a atingir a totalidade da junta, como demonstra a figura 40.

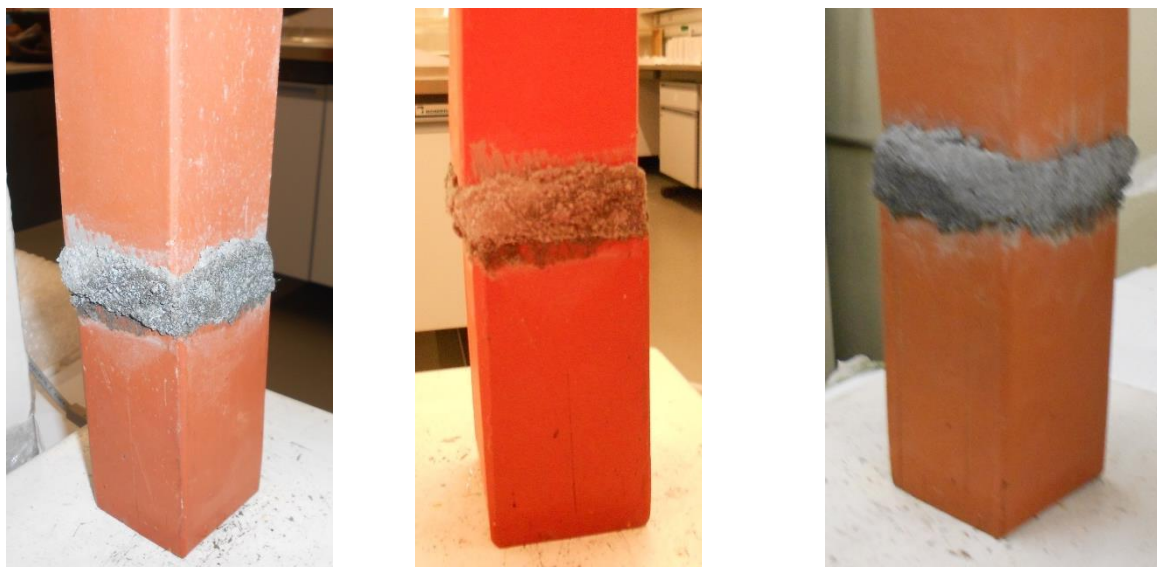


Figura 40 - fotografias do provete quando já estava estabilizado

Uma vez que o gráfico 27 tem o comportamento descrito pela figura 22, era já previsto que a frente húmida não atingisse a terceira camada (tijolo de 22cm).

4.2.5. DIFICULDADES

Ao longo deste ensaio foram surgindo vários problemas e dificuldades que se foram tentando superar e solucionar:

1. No fornecimento do material para a construção dos provetes, onde inicialmente estava previsto utilizar o granito, e três argamassas com diferentes coeficientes de absorção de água por capilaridade. A necessidade de substituir os provetes de granito por provetes de tijolo maciço teve como consequência atraso na construção dos provetes mas teve como vantagem realizar ensaios mais rápidos, uma vez que a absorção de água por capilaridade no granito iria ocorrer mais lentamente, podendo até ser incompatível com a duração prevista para o trabalho. Relativamente às argamassas não foi possível adquirir uma argamassa com um coeficiente de absorção de água mais elevado que o coeficiente de absorção de água do tijolo pelo que apenas foram construídos provetes com juntas de argamassa com um coeficiente de capilaridade mais baixo que o do tijolo. Esta alteração teve como consequência uma amostra de resultados obtidos mais pobre, e dificuldades nas comparações e conclusões da influência dos vários tipos de juntas.

2. Na construção de alguns provetes a argamassa não aderiu devidamente à superfície dos tijolos, devido esta ser muito lisa (figura 41), tendo sido necessário criar ranhuras com ajuda de uma lima nas superfícies, com a finalidade de aumentar a aderência dos tijolos e refazer os provetes.



Figura 41 - Provetes em que argamassa não aderiu ao tijolo

3. Ainda na construção dos provetes foi difícil garantir a espessura da junta uma vez que esta esbordava lateralmente quando se colocava o tijolo na face superior. Foi então criado um molde em papelão para segurar a argamassa, tal como se pode visualizar na figura 42.



Figura 42 - molde de papelão usado

4. Nos primeiros ensaios de capilaridade obtiveram-se resultados que contrariavam os resultados previstos e comuns (gráfico 28), concluindo-se, mais tarde, que as oscilações na absorção de água por capilaridade verificadas para os primeiros minutos se deviam ao facto dos provetes retirados da estufa algumas horas depois de se iniciar o ensaio ainda não estarem completamente frios e estabilizados. Os ensaios foram repetidos, mas desta vez não colocando

os provetes na estufa e estabilizando a sua massa á temperatura ambiente do LFC. Depois de sair da estufa os provetes iriam ganhar inevitavelmente uma quantidade mínima de teor de humidade devido à ambiência do laboratório. No entanto como os ensaios foram realizados no mesmo local, nada influenciou os resultados, uma vez que depois de estabilizados com a ambiência do laboratório, a quantidade de água absorvida corresponde à do ensaio de absorção.

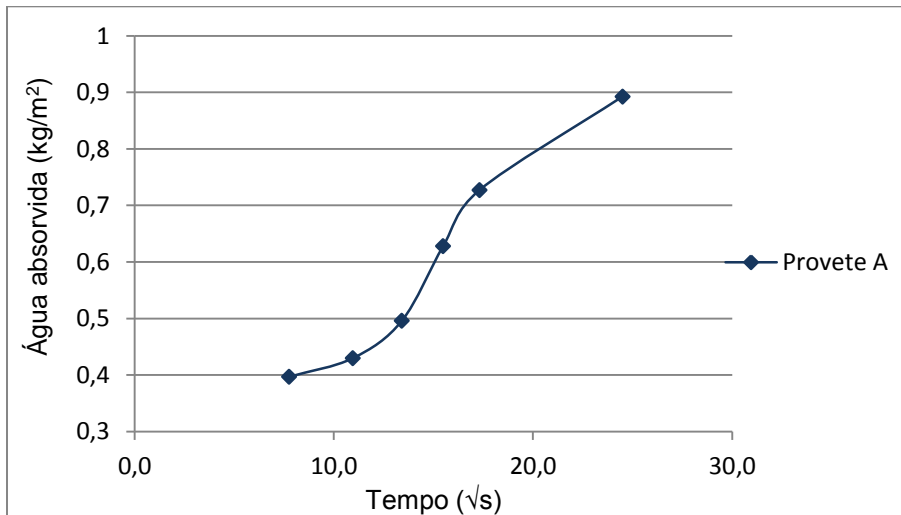


Gráfico 28 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete A

5. Durante a realização dos ensaios ocorreram ainda outros imprevistos na absorção de alguns provetes que não absorviam água logo após os 5 minutos de contacto com a água e continuavam com grandes oscilações na absorção (gráfico 29). Os provetes foram secos e ensaiados novamente mas voltou-se a ter o mesmo problema, pelo que foi necessário construir novos provetes e repetir os ensaios, tendo estes novos provetes resultados plausíveis.

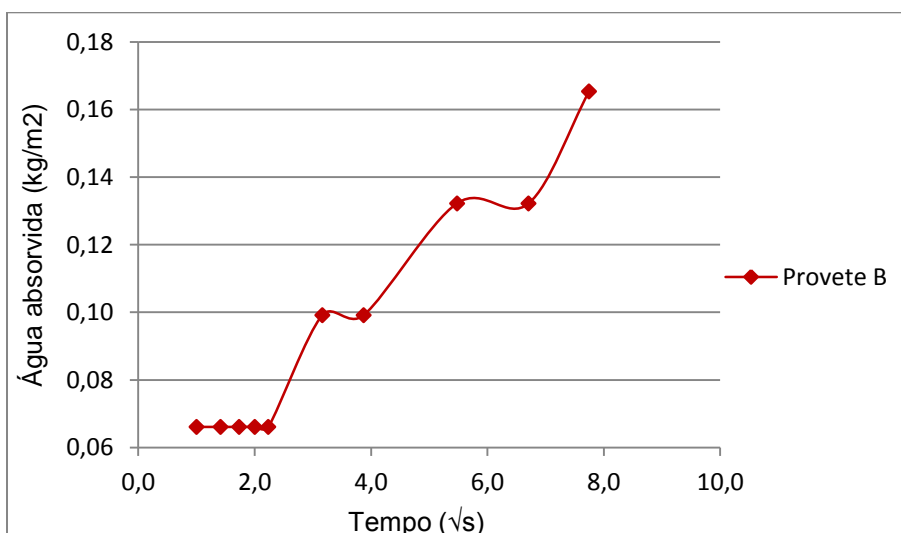


Gráfico 29 - Variação de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em função da raiz quadrada do tempo do provete B

4.2.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados destes ensaios permitem uma avaliação da absorção de água dos provetes ao longo do tempo calculando os respectivos coeficientes de absorção de água e determinado a influência dos vários tipos de juntas estudados (material, espessura e altura relativa á base).

Na tabela 9 estão representados os coeficientes de absorção de água por capilaridade obtidos bem como a quantidade de água absorvida para terceiro dia, o número de dias necessários para os provetes estabilizarem e o número total de dias de ensaio.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios

Proвете	Coeficiente de capilaridade (kg/m ² .√s)	Coeficiente de capilaridade (kg/m ² .√h)	Quantidade de água absorvida em 3 dias	Número de dias até estabilizar	Número de dias de ensaio
A	0,0461	2,7651	50,9	3	8
A'	0,0388	2,3285	38,1	3	8
B	0,0168	1,0094	58,3	8	21
C	0,0419	2,5114	62	4	7
D	0,0388	2,3285	55,7	~6	8
E	0,0211	1,2632	82,8	~13	29
F	0,0933	5,595	55,4	3	7
G	0,0211	1,2632	~103,9	~6	18
H	0,0175	1,0094	53,7	~4	7
I	0,0168	1,0094	132,9	7	21
C'	0,0306	1,836	58,3	4	14

Analisando a tabela 8 constata-se que os provetes com menor coeficiente de capilaridade são os provetes I, e B, I=B=0,0168 kg/m², que correspondem a provetes com a junta situada a 22cm. Os provetes com maior coeficiente de capilaridade são os provetes F, C e A, respectivamente 0,0933kg/m².√s 0,461 kg/m².√s e 0,0419 kg/m².√s.

Olhando para os resultados nota-se que há uma discrepância entre o provete F e os restantes provetes, e analisando os gráficos referentes a este provete verifica-se que em todos eles o provete F não tem um comportamento comum e semelhante aos restantes. Assim, os resultados referentes ao provete F deverão ser observados com precaução podendo ser discutida a sua validade.

Da análise da tabela 8 e dos gráficos 19 a 22 conclui-se que o tipo de argamassa, ou seja o coeficiente de capilaridade da argamassa não influencia muito significativamente a quantidade de água absorvida pelos provetes. Refira-se que, neste caso, ambas as argamassas apresentam valores de coeficiente de absorção de água por capilaridade inferiores ao do tijolo, justificando o seu comportamento semelhante.

Analisando agora a quantidade de água absorvida pelos provetes, verifica-se que os provetes que absorveram maior quantidade de água foram os provetes I e G, seguindo-se os provetes E e B. Conclui-se assim que o factor que mais influenciou a quantidade de água absorvida foi a altura a que

se situa a junta, uma vez que com maiores alturas se obteve maior quantidade de água absorvida. Consequentemente estes provetes demoraram mais tempo a estabilizar.

O tempo que cada provete demorou até atingir a estabilização (atingir o nível máximo de ascensão capilar) diferiu conforme a altura da junta, isto é, conforme a quantidade de água absorvida. O provete que demorou mais tempo a estabilizar foi o provete E e os provetes que demoraram menor tempo foram os provetes A e A' (provetes sem juntas).

Analisando os gráficos de absorção de água obtidos verifica-se que estes assumem o comportamento da figura 28, em que a absorção de água por capilaridade nos provetes ocorre, essencialmente nos primeiros minutos do seu contacto com água, registando-se uma diminuição significativa ao longo do tempo até ser praticamente zero.

Os coeficientes de absorção dos provetes de multicamadas situam-se todos entre o coeficiente de absorção das argamassas e o coeficiente dos provetes monolíticos.

Salienta-se, que os valores obtidos para os coeficientes de capilaridade são distintos aos obtidos por Vasco Freitas e João Ferreira [8,12]. Os valores obtidos são consideravelmente mais baixos (tabela 10). Esta discrepância entre valores deve-se ao facto de os tijolos usados neste ensaio laboratorial tratarem-se de tijolos maciços que são utilizados em fachadas exteriores sofrendo durante a sua fabricação um processo de cozedura a altas temperaturas que provocam uma diminuição da sua porosidade e consequentemente uma diminuição da sua absorção de água.

Tabela 10 - Comparação com resultados de outros autores

Autores	Coeficiente de capilaridade (kg/m ² *√s)
Resultados obtidos neste ensaio (proвете monolítico de 22cm)	0,0486
Resultados Vasco Freitas [8]	0,05
Sousa, J.M. and V. Peixoto de Freitas [30]	0,0505
Apontamentos da aula de Patologias e Reabilitação de Edifícios [2]	0,0622

Como se pode verificar pela tabela 11, o tijolo vitrificado demora mais tempo a absorver água do que o tijolo normal, pelo que se justifica de certo modo os inferiores coeficientes de absorção obtidos.

Tabela 11 - Sucção do tijolo [19]

Material	Sucção da água (segundos)
Tijolo vitrificado	1737
Tijolo	11

A tabela 11, apresenta alguns resultados da porosidade aberta do barro vermelho determinados por Vasco Freitas, Bomberg, Gertis e Werner.

Analisando a tabela 12 e sabendo que um dos factores que mais condiciona a capilaridade dos materiais é a porosidade, pode-se justificar a diferença entre os valores obtidos no coeficiente de absorção de água na tabela 9.

Tabela 12 - Porosidade aberta do barro Vermelho (Vol%) [8]

Autores	Porosidade aberta (ϵ) do Barro Vermelho [% Vol]
Vasco Freitas	28
Bomberg	31
Gertis e Werner	25

Na tabela 13 apresenta-se a classificação segundo o CSTB, para revestimentos á base de ligantes hidráulicos em função do coeficiente de capilaridade ($\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$):

Tabela 13 - Classificação do CSTB para revestimentos da fachada [2]

Coeficiente de capilaridade ($\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)	Classificação CSTB
$C > 4$	Revestimento de forte capilaridade
$1,5 < C < 4$	Revestimento de fraca capilaridade
$C < 1,5$	Revestimento de muito fraca capilaridade

A partir do coeficiente de absorção, A, Holm [30], classifica os materiais em quatro grupos:

- $A > 2.0 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}$ – sucção rápida;
- $A < 2.0 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}$ – preventivo contra a água;
- $A < 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}$ – quase impermeável;
- $A < 0,001 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}$ – impermeável.

Recorrendo a estas duas classificações obtemos a tabela 14. De acordo com a classificação de Holm todos os provetes têm uma sucção rápida ou preventiva contra a água. Os provetes com sucção rápida correspondem aos provetes monolíticos e aos provetes da argamassa 1 com a junta situada a 11cm da base (A, A', C e D).

Relativamente à classificação do CSTB os provetes têm uma fraca ou muito fraca capilaridade. Em que os de fraca capilaridade correspondem aos provetes monolíticos, aos provetes da argamassa 1 com junta a 11cm da base e ao provete sem impermeabilizante (A, A', C, D, C').

Observando os gráficos de 3 a 27 verifica-se que as curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes de multicamadas têm o comportamento descrito na figura 27, isto é, em nenhum deles a água ultrapassou a junta.

Tabela 14 - classificação dos provetes segundo Holm.

Proвете	Coefficiente de capilaridade (kg/m ² *√h)	Classificação Holm	Classificação segundo CSTB
A	2,7651	Sucção rápida	Fraca capilaridade
A'	2,3285	Sucção rápida	Fraca capilaridade
B	1,0094	Preventivo contra a água	Muito fraca capilaridade
C	2,5114	Sucção rápida	Fraca capilaridade
D	2,3285	Sucção rápida	Fraca capilaridade
E	1,2632	Preventivo contra a água	Muito fraca capilaridade
G	1,2632	Preventivo contra a água	Muito fraca capilaridade
H	1,0094	Preventivo contra a água	Muito fraca capilaridade
I	1,0094	Preventivo contra a água	Muito fraca capilaridade
C'	1,8360	Preventivo contra a água	Fraca capilaridade

4.3. ENSAIO DE SECAGEM

4.3.1. INTRODUÇÃO

A secagem dos materiais porosos é um processo complexo, que envolve transporte de água na fase líquida e na fase vapor. Esta depende das condições climáticas do local (temperatura, humidade, pressão e velocidade do vento) e da natureza do material, sobretudo dos seus poros.

Macroscopicamente a secagem é um processo que se divide em três fases principais, observáveis nas figuras 43 e 44.

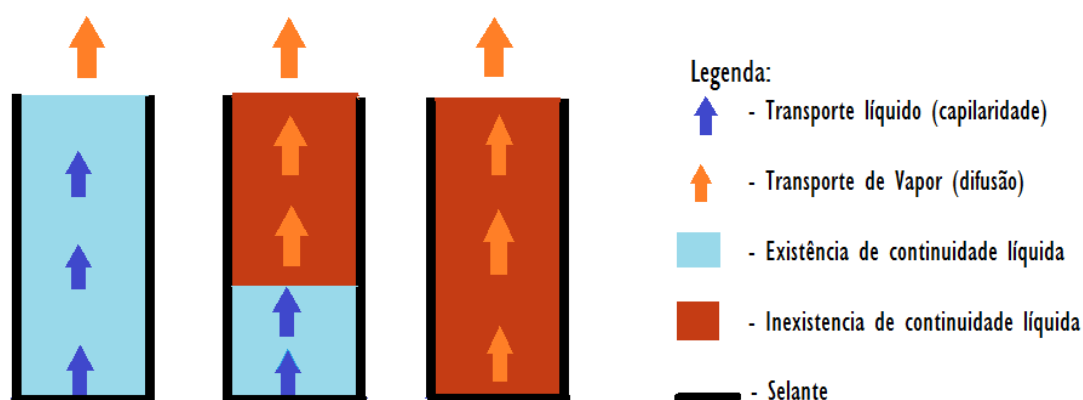


Figura 43 - fases do processo de secagem

1. Na primeira fase a água líquida é transportada até a superfície do material por ação das forças capilares, a uma taxa de secagem constante, ocorrendo a evaporação na superfície do material, e diminuindo o teor de humidade que se mantém uniforme em todo o material.
2. Na segunda fase a quantidade de água à superfície é insuficiente atingindo-se o teor de água crítico. A frente de secagem começa a recuar para o interior do material e o transporte de humidade é feito pelas forças capilares até à frente de secagem e por difusão do vapor até à superfície. A taxa de secagem é decrescente.
3. Na terceira fase o transporte da humidade efectua-se apenas por difusão do vapor. A taxa de secagem torna-se ainda mais lenta até se atingir o equilíbrio higroscópico. Este equilíbrio pode demorar anos, sendo que materiais com maiores poros secam mais rapidamente.

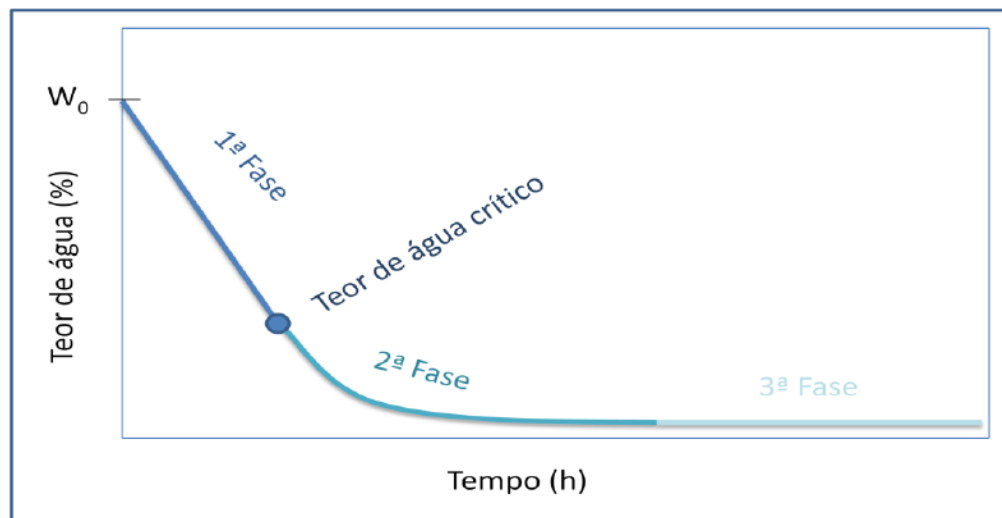


Figura 44 - Curva típica de secagem em materiais porosos [5]

O coeficiente de transferência superficial de humidade (β) é muito complexo e de difícil determinação devido ao facto da transferência de humidade e de calor à superfície se darem conjuntamente. Este depende de:

- Teor de humidade do material poroso à superfície;
- Humidade relativa do meio ambiente;
- Temperatura do meio ambiente;
- Rugosidade da superfície;
- Turbulência e velocidade do ar na superfície da parede.

Na tabela 15 estão representados alguns coeficientes de transferência superficial de humidade determinados por Gertis, darolles e Couasnet, bem como uma média.

Tabela 15 - valores para coeficiente β [11]

Autor	β_i -interior (m/s)	β_e -exterior (m/s)
Gertis	$1,2 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$
Darolles	$2,4 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-2}$
Couasnet	$8,6 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$
Média	$\beta_i = 1,2 \times 10^{-2}$	$\beta_e = 1,2 \times 10^{-2}$

O tempo de secagem de uma parede homogénea com espessura e pode ser estimado pela equação 9:

$$T = s \times e^2 \quad (9)$$

Em que:

T- duração da secagem em dias

e- espessura da parede [cm]

s – coeficiente característico do material da parede (tabela 16)

Esta fórmula só serve como aplicação para humidade relativa de 70% e velocidade do vento inferior a 0,1 m/s. No quadro abaixo podemos ver as constantes de secagem para alguns materiais de construção.

Tabela 16- coeficientes característicos do material da parede [25].

Materiais	S
Betão celular	1,20
Tijolo	0,28
Pedra calcária	1,20
Cortiça	0,14
Argamassa cal	0,25
Argamassa cimento	2,50
Madeira de Pinho	0,90

O estudo do processo de secagem foi realizado de acordo da norma RILEM, 1980 [27]. Esta norma de ensaio consiste em saturar um provete por submersão em água, e de seguida coloca-lo num processo de secagem. O provete deve ter cinco das suas seis faces seladas, de modo a que o transporte de água apenas se efectue numa direção. A curva de secagem é obtida através de pesagens periódicas, pelas quais se determina a variação do teor de água ao longo do tempo (figura 44).

Os resultados do ensaio de secagem serão expressos através do cálculo do índice de secagem (I.S) e do teor de água (Wo) [13]. O índice de secagem é determinado a partir da equação 10:

$$I.S = \frac{\int_{t_0}^{t_i} F(w_i) \times dt}{W_0 \times t_i} \quad (10)$$

Em que:

F(w)- é o teor de água no provete em função do tempo [%]

W_o – é o teor de água inicial [%]

T_i – é o tempo total do ensaio [h]

O tempo total do ensaio corresponde ao tempo total até ao surgimento da assíntota horizontal no gráfico de evaporação (figura 53). O teor de água é dado em percentagem ponderal de massa seca e obtém-se através da equação 11:

$$w_i = \frac{m_i - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad [\%] \quad (11)$$

Sendo que :

w_i -o teor de água [%]

m_i -a massa do provete no instante t_i [g]

m_{seca} - a massa do provete seco em estufa [g]

4.3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O ensaio de secagem foi realizado na sequência do ensaio de capilaridade, sobre os mesmos provetes, uma vez que se pode considerar que no ensaio de capilaridade os provetes atingiram o seu ponto de saturação capilar (os poros do material encontram-se preenchidos por água), facilitando o cruzamento dos resultados dos dois ensaios e minimizando a possibilidade de ocorrência de variações devidas à heterogeneidade dos materiais.

O ensaio de secagem foi então realizado logo após o término do ensaio de capilaridade, onde foram mantidas constantes as condições de temperatura e humidade relativa. Para tal, foi necessário utilizar os seguintes materiais:

- Balança;
- Relógio;
- Folhas de polietileno (figura 45);
- Fita-cola.

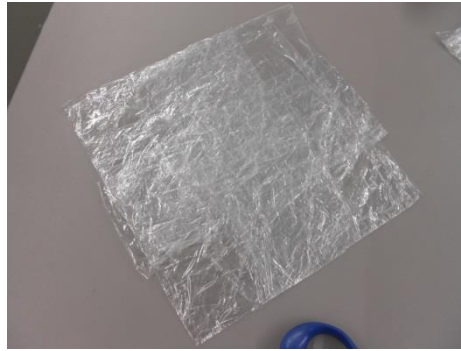


Figura 45- Folhas de polietileno

A fita-cola e as folhas de polietileno serviram para selar a face inferior do provete (aquela que estava em contacto com a água no ensaio de capilaridade), para garantir uma secagem unidirecional e apenas através da face superior (figura 46).



Figura 46 - Provete selado inferiormente

4.3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental para a secagem dos provetes foi realizado de acordo com o No. II.5 “Evaporation curve” da RILEM (RILEM 1980) [27]. Este ensaio foi realizado nos mesmos 11 provetes utilizados no ensaio de absorção. Terminado o ensaio de absorção, os provetes foram pesados e a face inferior foi selada com quatro folhas de polietileno, iniciando-se o processo de secagem.

Para avaliar a quantidade de água evaporada foram realizadas pesagens periódicas numa balança com resolução de 0,1g. As pesagens foram realizadas nas primeiras 8h e depois com uma periodicidade de 2h nas primeiras duas semanas e de 3h nas semanas seguintes (dias úteis).

Com os resultados dos ensaios foram determinadas as curvas de evaporação de cada um dos provetes de acordo com a norma.

De referir que os provetes se mantiveram afastados das paredes assim como de outros obstáculos que pudessem influenciar a secagem no laboratório, com uma temperatura a variar entre 21°C e 25°C e a humidade relativa entre 50% e 60% (figura 47).

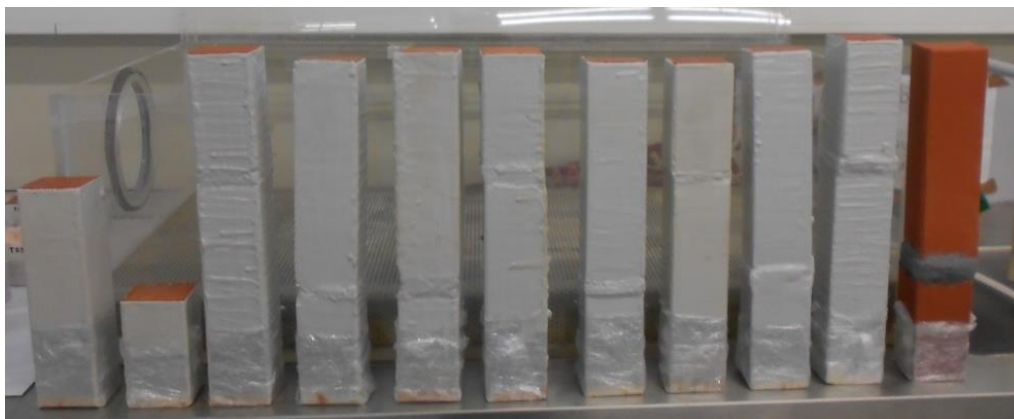


Figura 47 - Provete em processo de secagem.

4.3.4. RESULTADOS OBTIDOS

Como se verifica pela análise gráficos 30 a 44 a secagem total dos provetes não chegou a ser atingida por nenhum deles. Pelo que as curvas de evaporação ainda se encontram praticamente todas na primeira fase de secagem com exceção do provete A', que se encontra na segunda fase de secagem, gráfico 30.

Uma vez que nenhum provete atingiu a terceira fase de secagem, não foi possível calcular o índice de secagem, dado que para este seria necessário o tempo total do ensaio de secagem.

O ensaio de secagem iniciou-se consecutivamente ao ensaio de absorção de água por capilaridade, e uma vez que os provetes no ensaio de absorção demoraram tempos diferentes a atingir a estabilização não foi possível iniciar a secagem de todos os provetes ao mesmo tempo. Como consequência na comparação dos gráficos seguintes, alguns dos provetes não têm o mesmo tempo de secagem, uma vez que o início dos ensaios ($t=0$ horas) ocorreu em diferentes dias e o final do ensaio terminou na mesma data (data limite para termino deste trabalho).

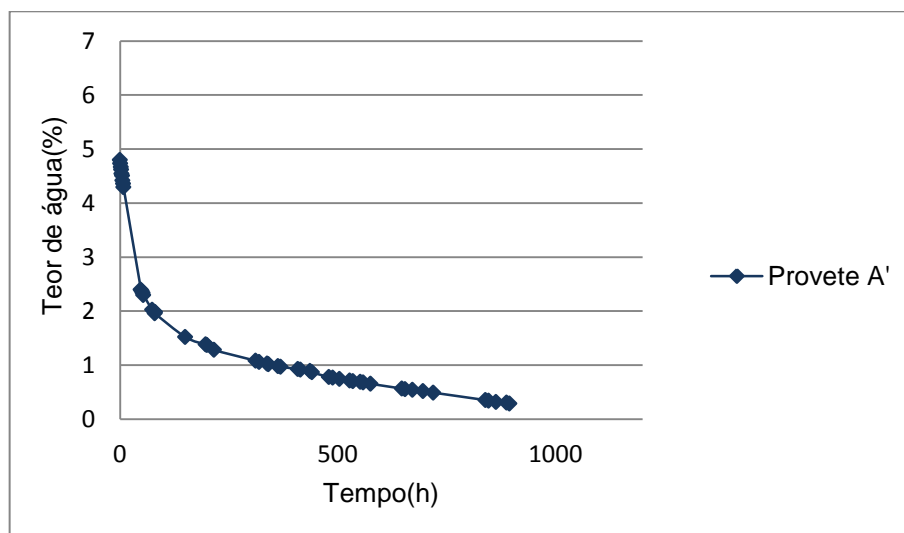


Gráfico 30 - Curva de evaporação do provete A'

Análise dos provetes monolíticos (sem juntas):

No gráfico 31, verifica-se que os dois provetes se encontram em distintas fases de secagem. Apesar de ter um maior teor de água inicial (absorveu maior quantidade de água no ensaio de capilaridade), o provete A' já se encontra numa fase mais avançada no processo de secagem quando comparado com o provete A. Conclui-se então que a altura do provete influencia significativamente o seu processo de secagem. Esta influência da altura é superior à influência do teor de humidade inicial.

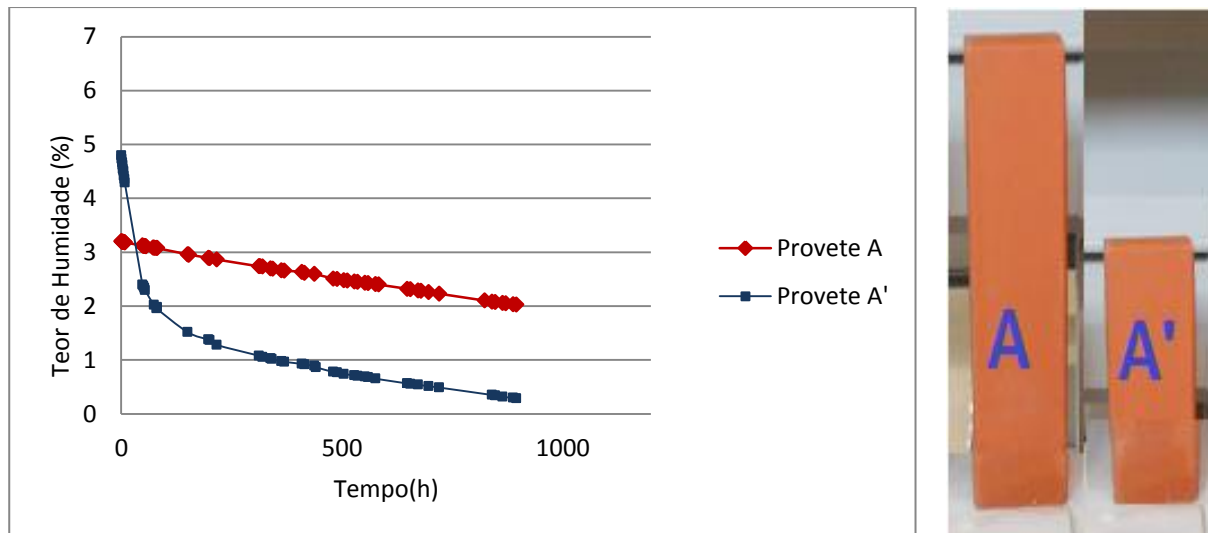


Gráfico 31 – Curva de evaporação do provete A e A'

Influência da altura da junta

Da análise dos gráficos 32 a 35 percebe-se qual a influência da altura da junta no fenómeno da secagem. Foram analisados 4 provetes, 2 provetes com argamassa tipo 1 e 2 provetes com argamassa tipo 2. Os gráficos 32 e 33 referem-se aos provetes de argamassa tipo 1 (B, C, D e E) e os gráficos 34 e 35 aos provetes de argamassa tipo 2 (F, G, H, I).

Nos gráficos 32 e 34 estão representados provetes com 1cm de espessura e nos gráficos 33 e 35 estão representados provetes com 2cm de espessura. Assim cada um dos gráficos tem como variante a altura a que a junta se situa. Sendo que, nos provetes B, E, G e I a junta está a 22cm da base e nos provetes C, D, F e H a junta está a 11cm da base.

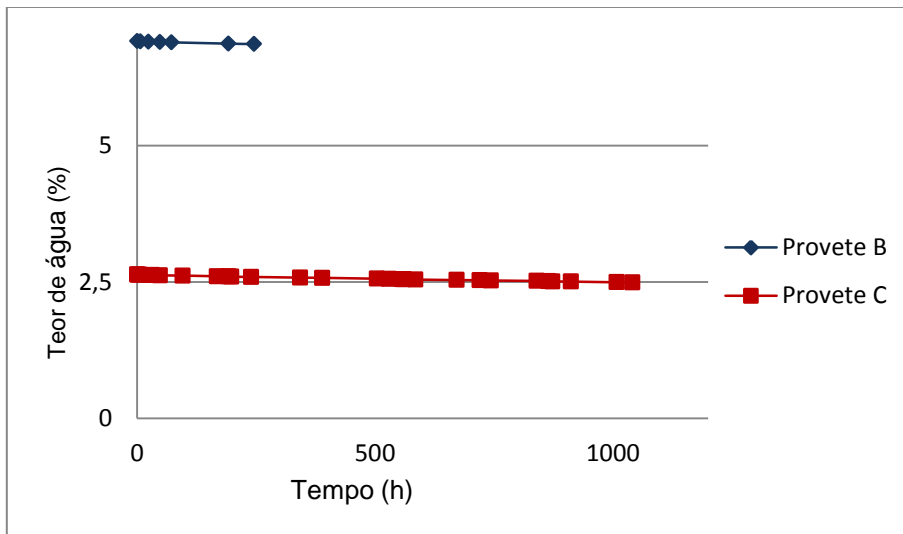


Gráfico 32 - Curva de evaporação do provete B e C.

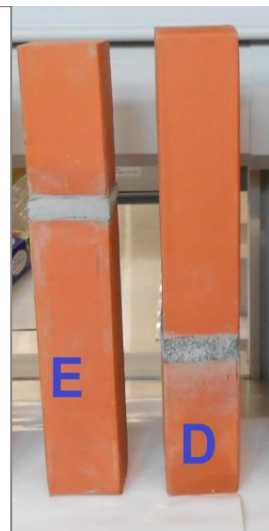
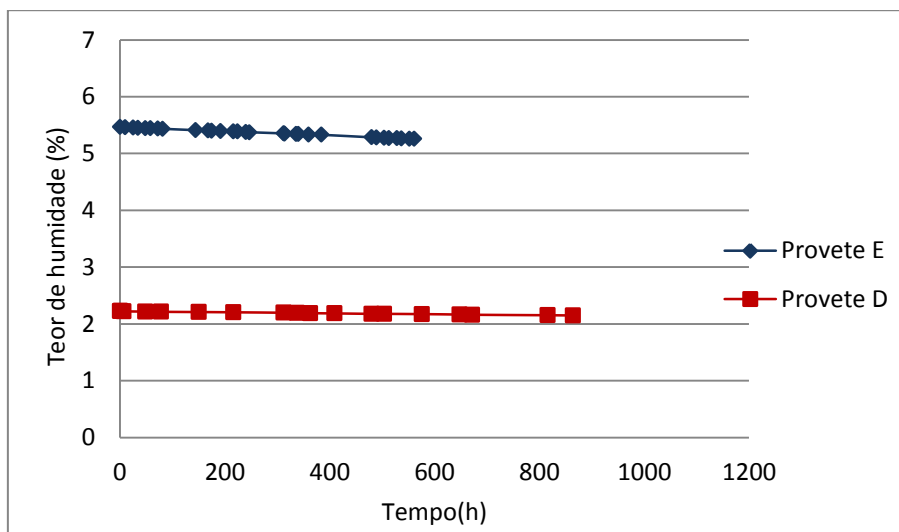


Gráfico 33 - Curva de evaporação do provete E e D.

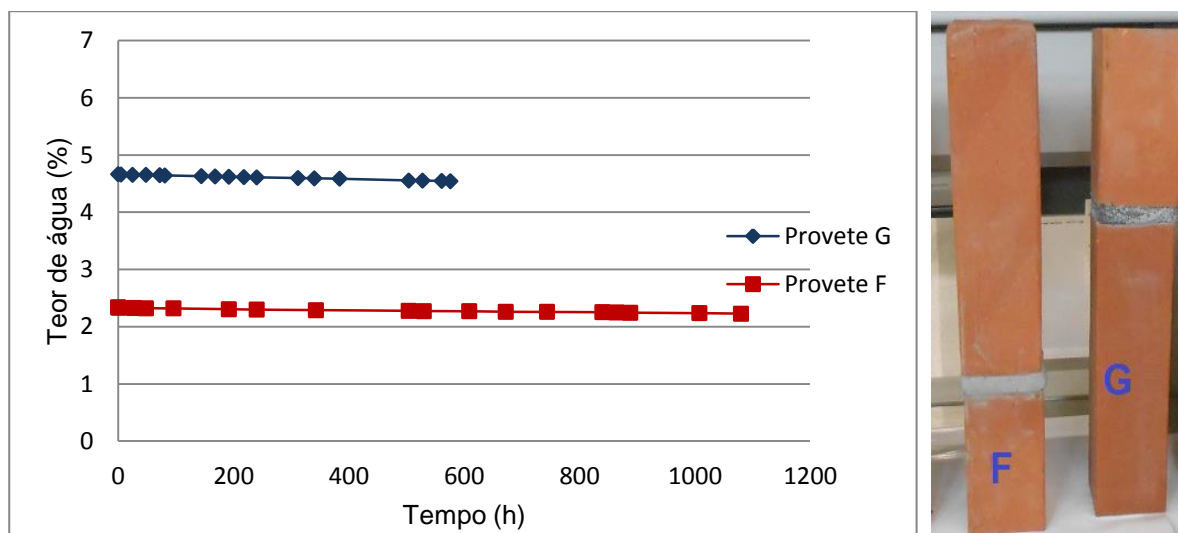


Gráfico 34 - Curva de evaporação do provete G e F.

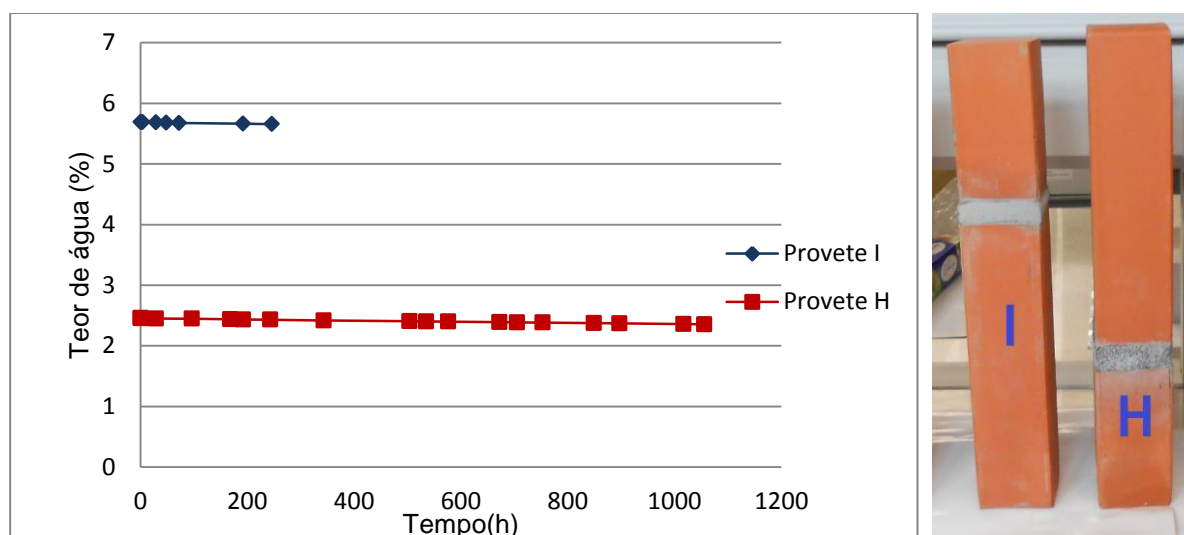


Gráfico 35 - Curva de evaporação do provete I e H.

Analisando os gráficos 32 a 35 verifica-se que inicialmente os provetes têm comportamentos muito semelhantes, apesar de alguns deles ainda terem poucos dias de secagem (provetes I, B e C').

É visível que os provetes com uma junta situada a 22cm da base, representados pela linha azul, atingem maiores teores de água. Mais uma vez se confirma que a altura a que se situa a junta é um factor preponderante no teor de humidade absorvido.

Relativamente à velocidade de secagem é visível que ainda todos eles se encontram na primeira fase de evaporação, pelo que não é possível comparar e perceber eficientemente a influência da altura da junta no processo de secagem.

Influência da espessura da junta

Nos gráficos 36 a 39 é possível avaliar a influência da espessura da junta, uma vez que os provetes utilizados são análogos variando somente as espessuras da junta, junta com 1cm ou 2cm.

Os gráficos 36 e 37 são referentes a provetes com a junta situada a 11cm da base do provete (C, D, F e H) e os gráficos 38 e 39 a provetes com a junta distanciada de 22cm da base (B, E, G e I).

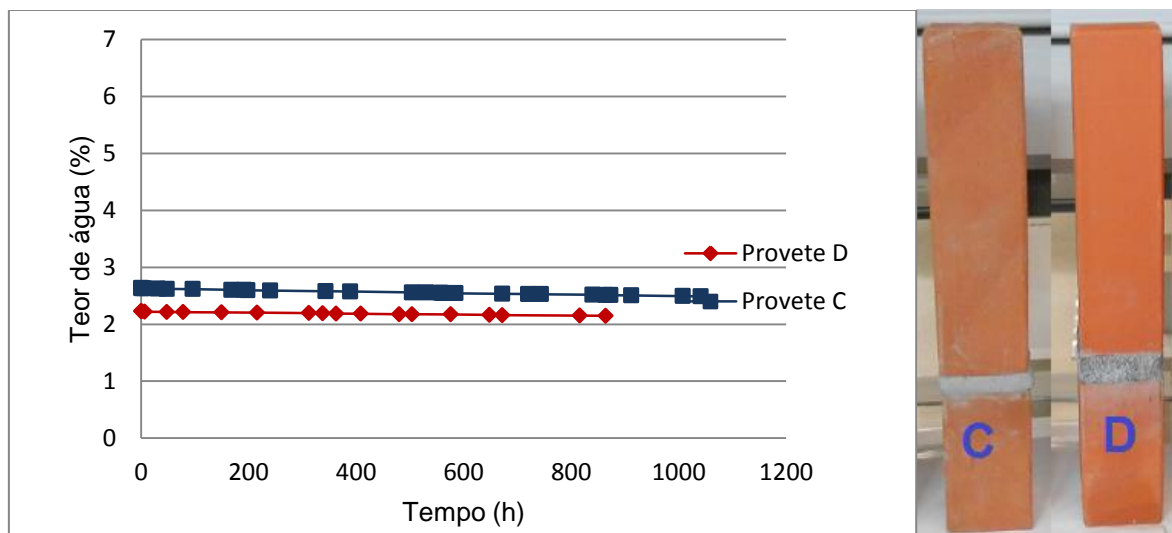


Gráfico 36 - Curva de evaporação do provete C e D.

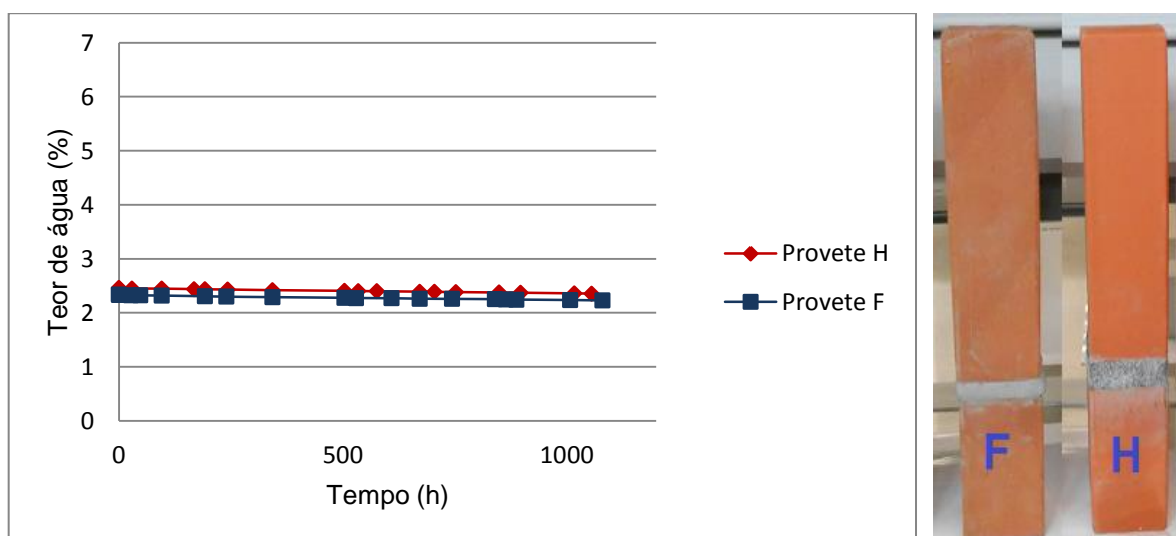


Gráfico 37 - Curva de evaporação do provete H e F.

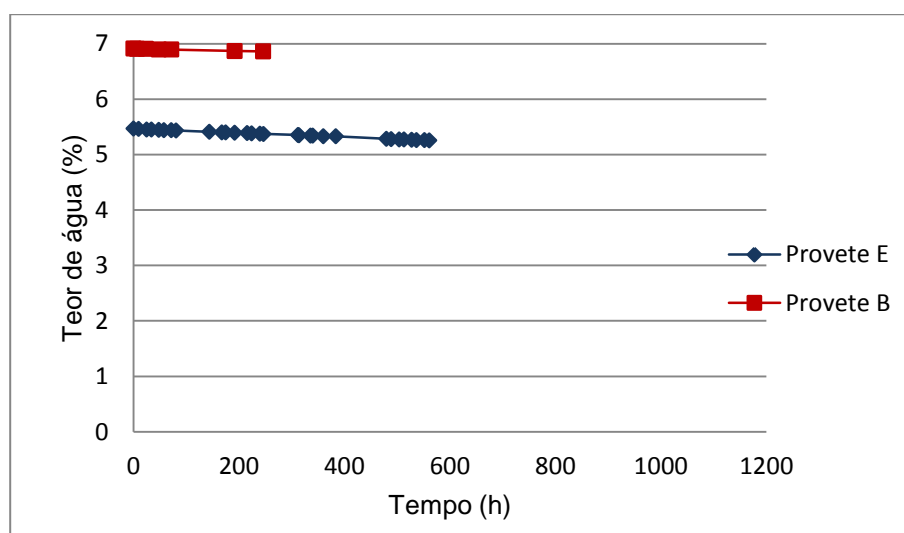


Gráfico 38 - Curva de evaporação do provete E e B.

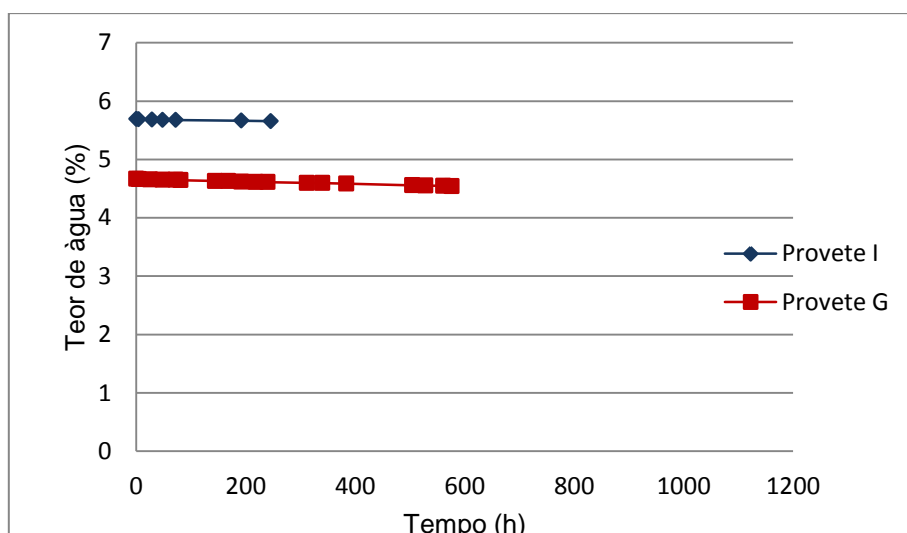


Gráfico 39 - Curva de evaporação do provete I e G.

Analisando os gráficos de 36 a 39 verifica-se que os provetes têm um comportamento muito semelhante ao longo do tempo.

Estes gráficos correspondem a dois provetes similares duplicando apenas a espessura da junta de 1cm provete (C, B, G e F) para 2cm (provetes D, E, H e I).

Apesar de alguns dos provetes já estarem há mais de um mês a secar estes ainda se encontram todos na primeira fase de secagem, pelo que ainda não é possível comparar a influência da espessura da junta neste processo.

Era já esperado que os provetes não terminassem o processo de secagem, uma vez que este é um processo muito lento e dois meses seria pouco tempo para a secagem “total” dos provetes.

Tipo de argamassa da junta

Nos gráficos 40 a 43 estão representados provetes com as mesmas características diferindo apenas no tipo de argamassa. Os provetes F, G, H e I são provetes com juntas da argamassa 2 (curvas de secagem de cor azul) e os provetes C, B, D, E são provetes com juntas de argamassa 1 (curvas de secagem de cor vermelha). Analisando estes gráficos pode-se avaliar a influência da argamassa da junta na evaporação da água.

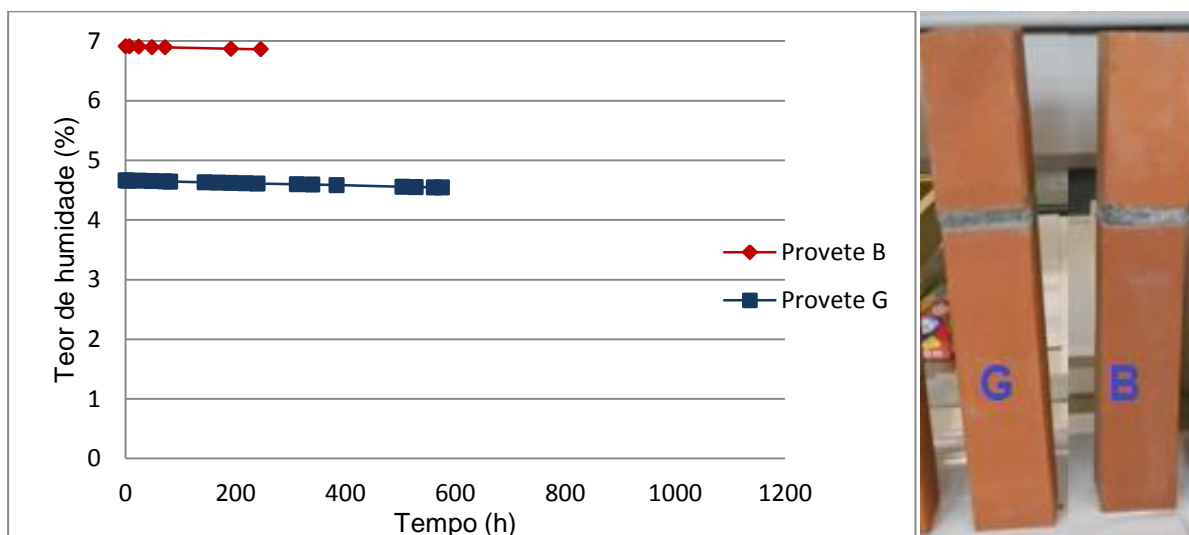


Gráfico 40 - Curva de evaporação do provete B e G.

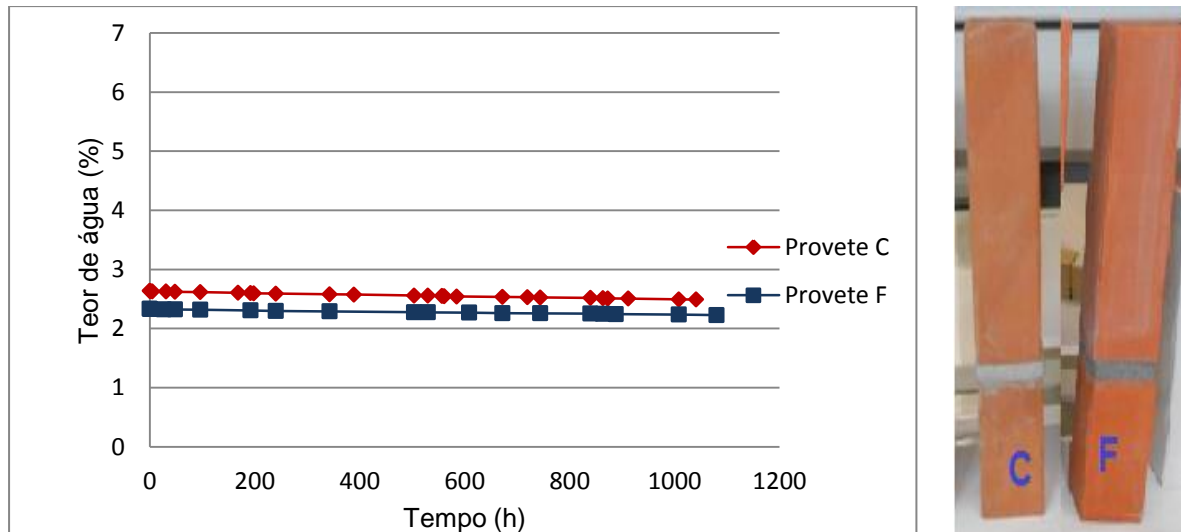


Gráfico 41 - Curva de evaporação do provete C e F.

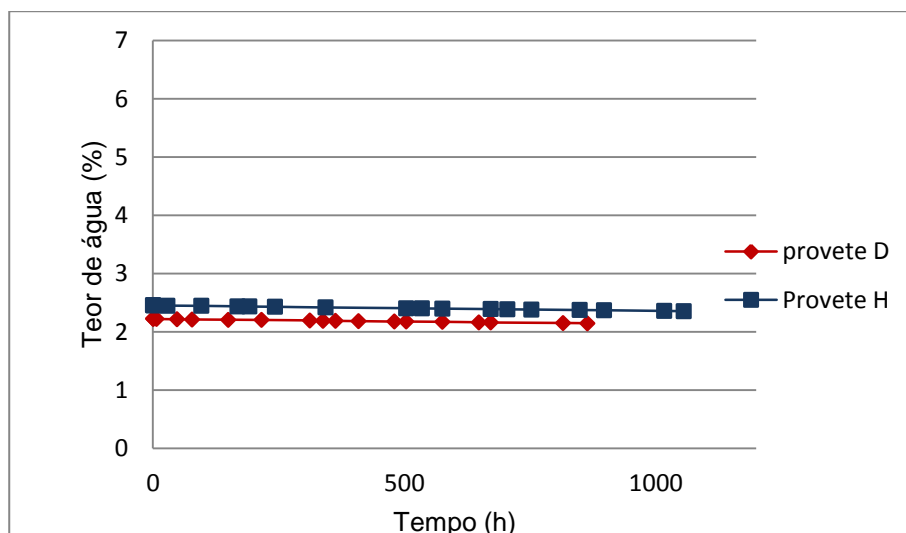


Gráfico 42 - Curva de evaporação do provete H e D

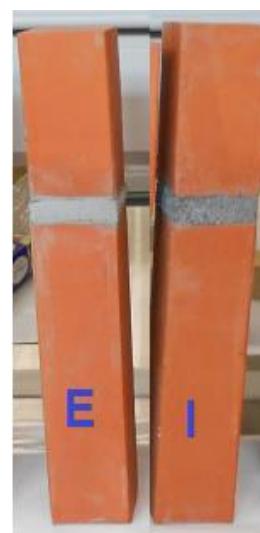
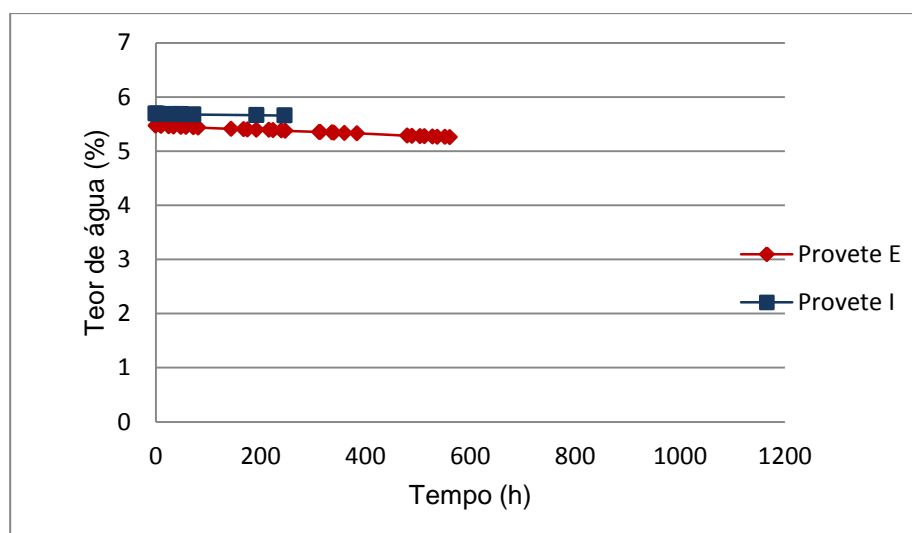


Gráfico 43 - Curva de evaporação do provete E e I.

Observando os gráficos 40 a 43 verifica-se novamente que todos os provetes têm um comportamento semelhante e que todos eles ainda se encontram na primeira fase de secagem, pelo que não é possível analisar a influência do tipo de argamassa na junta na secagem dos provetes.

Provete C/ C' com e sem impermeabilizantes

No gráfico 44, encontram-se representados o provete C e C', provete impermeabilizado e provete não impermeabilizado, respectivamente. Analisando este gráfico, verifica-se que o comportamento de ambos difere muito.

O provete C' evaporou uma maior quantidade do teor de água num menor tempo. Tal já era previsível uma vez que o provete C' não estava impermeabilizado, e a área de evaporação é muito superior á do provete C, fazendo com que o processo de secagem evolua mais rapidamente (figura 48).

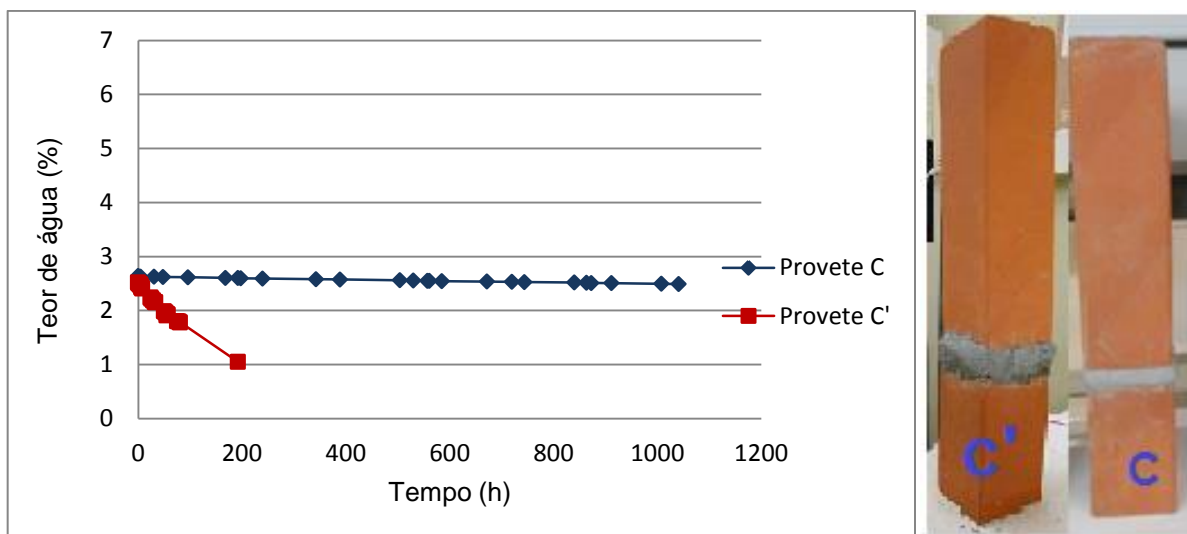


Gráfico 44 - Curva de evaporação do provete E e I.



Figura 48 - Provete C' no processo de secagem.

Na tabela 17 estão registados os valores obtidos no ensaio de secagem, nomeadamente o teor de água inicial, final e evaporado, o tempo de ensaio decorrido e ainda o tempo de ensaio estimado pela equação 9.

Tal como se tinha verificado nas curvas de secagem, o provete A' foi o provete que maior quantidade de água evaporou, seguindo-se do provete C'.

Não foi possível calcular o índice de secagem dos provetes, porque este depende do tempo total do ensaio, e os ensaios não foram terminados, o tempo total que obtido foi aquele até onde se conseguiu realizar as pesagens. O tempo de secagem de cada um dos provetes não foi igual para todos os provetes, um cálculo de comparação que envolve-se o tempo decorrido não seria correcto.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de secagem

Provete	W inicial	W final	W evaporado	Tensaio (h)	Tempo secagem tijolo HR=70% (h)
A	3,204	2,025	1,179	895	3252,48
A'	4,794	0,289	4,505	895	813,12
B	6,914	6,862	0,052	246	7768,32
C	2,637	2,490	0,147	1085	7768,32
D	2,285	2,149	0,137	895	8232
E	5,468	5,256	0,211	585	8232
F	2,335	2,228	0,107	1085	7768,32
G	4,665	4,544	0,120	585	7768,32
H	2,458	2,355	0,103	1085	8232
I	5,691	5,656	0,035	246	8323
C'	2,519	1,050	1,469	192	7768,32

Apesar de o tempo de secagem estimado calculado apenas se aplicar para condições de HR=70% e para elementos de um só material, é possível ter uma noção que o tempo que seria necessário para uma completa secagem dos provetes ensaiados é muito superior ao tempo decorrido e ao tempo disponibilizado para a realização deste trabalho.

4.3.5. DIFICULDADES

Neste ensaio a maior dificuldade foi a falta de precisão da balança, onde por vezes foi necessário realizar várias pesagens no mesmo instante devido a resultados díspares como o aumento de massa ou perda excessiva de massa num curto espaço de tempo.

Houve também dificuldades relativamente à duração da secagem, uma vez que os provetes demoraram bastante tempo a secar, não sendo possível efectuar uma secagem total de todos os provetes, pelo que as curvas de evaporação dos provetes se encontram praticamente todas na primeira fase de secagem, tornando os gráficos incompletos e impossibilitando a extracção de conclusões.

4.3.6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Devido ao lento processo de secagem dos provetes, os resultados obtidos neste ensaio de evaporação do teor de humidade não nos permitem tirar grandes conclusões acerca da influência da interface neste processo.

A tabela 18, refere algumas velocidades de secagem, dependendo da humidade relativa e velocidade do vento. Neste é possível perceber que o processo de secagem é realmente muito lento, pelo que é natural que os provetes ensaiados ainda estejam numa fase inicial, sendo necessários cerca de 5 meses para que os provetes ficassem relativamente secos como analisado na tabela 17.

Tabela 18 - Velocidades médias de secagem observadas no CSTB, em Nantes, para diferentes classes de H.R. e velocidades do vento.

Humidade Relativa do ar e velocidade do vento		Velocidade de secagem (kg/m ² .h)
U < 70%	V > 2m/s	-0,314
	V < 2m/s	-0,236
70% < U < 90%	V > 2m/s	-0,156
	V < 2m/s	-0,158
U < 90%	V > 2m/s	-0,073
	V < 2m/s	-0,059

Através do provete A', único provete que atingiu a 2º fase do processo de secagem, é possível constatar que a altura do provete tem uma grande influência no processo de evaporação de água.

5

CONCLUSÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A humidade ascensional depende das condições climáticas das ambiências (temperatura e humidade relativa), da insolação, da presença de sais, da porosidade e porometria dos materiais, da espessura da parede e da natureza dos materiais de revestimento.

Nos ensaios de absorção capilar realizados sobre os vários tipos de juntas, verificou-se que as propriedades capilares dos provetes diferiam bastante. Este estudo permite afirmar que a altura atingida pela frente húmida, é significativamente influenciada pela altura a que a junta se situa, sendo este um dos factores mais preponderante na quantidade de água absorvida. Apesar de uma menor influência no fenómeno de embebição, a espessura da junta e o tipo de argamassa utilizada, ou seja o coeficiente de absorção de água da junta, também influenciam a quantidade de humidade absorvida pelos provetes.

O tipo de junta que absorveu menos água foi a do provete D, seguindo-se a do provete H. Estes os provetes têm uma junta com 2cm de espessura que se situa a 11cm da base. As juntas que absorveram mais água foram as juntas do provete I e G. Estes provetes têm uma junta situada a 22cm da base e são construídos por a argamassa de maior coeficiente de capilaridade.

Através dos resultados do provete C', foi possível concluir que a frente húmida não ultrapassou a junta do provete. Comparando os resultados deste provete com o provete C, constata-se que são muitas as semelhanças entre estes dois provetes relativamente á humidade absorvida, pelo que é viável admitir que os restantes provetes tiveram o mesmo comportamento relativamente à resistência hídrica criada, impedindo que a água ultrapassa-se a junta.

A influência da junta na humidade ascensional pode ser também confirmada pelos resultados dos coeficientes de absorção dos provetes. Os resultados dos dois provetes monolíticos A e A', foram respectivamente $0,0461 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ e $0,0388 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$. Analisando estes dois valores conclui-se que a altura dos monolíticos é também de grande relevância na absorção de água. Reparando que nenhum dos coeficientes dos restantes provetes tem valores superiores ao do provete A e A' pode-se concluir que para combater a humidade ascensional é preferível termos elementos construtivos com juntas a baixa cota sendo que as juntas têm que apresentar um coeficiente de absorção de água inferior ao do tijolo ou outro material que constitui a parede.

Resumidamente as juntas podem ser adoptadas nos elementos construtivos como forma de evitar a ascensão capilar da água, isto é podem ser utilizadas como uma “barreira hídrica” que permite reduzir a humidade ascensional, sendo que estas devem ser colocadas o mais próximo possível da base do elemento construtivo, devem ter elevada espessura e o menor coeficiente de absorção de água possível.

No ensaio de secagem não foi possível tirar evidências e conclusões da influência dos vários tipos de junta, pelo facto de não ter sido exequível o término dos ensaios.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Diminuir a taxa de secagem pode levar a um prolongamento no tempo da presença de humidade e à extensão da área afectada. Uma vez que neste trabalho não foi possível tirar conclusões sobre a influência da junta, no fenómeno de secagem, sugere-se que sejam realizados novos estudos sobre a influência da interface da cinética de secagem de paredes com múltiplas camadas.

Sugere-se que seja realizado um estudo da influência na interface da cinética de embebição e secagem de paredes com múltiplas camadas com a presença de sais, uma vez que a água que ascende nas paredes não é normalmente água pura, mas sim água com substâncias químicas que alteram o fenómeno de absorção e secagem.

Sabendo-se que os materiais têm comportamentos diferentes e que neste trabalho apenas se analisou a influência de cinética de embebição e secagem em provetes de tijolo com juntas de argamassa com um baixo coeficiente de capilaridade, sugere-se:

- A realização de ensaios e respectiva análise da influência da interface de cinética de embebição e secagem em outros materiais, como por exemplo betão e pedra;
- A análise da influência da interface de cinética de embebição e secagem em juntas com um coeficiente de capilaridade elevado;
- A realização de ensaios de absorção de água por capilaridade em provetes não impermeabilizados para permitir a medição da altura atingida pela frente húmida.

6

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wendler, E. and Charola, A. (2008) - *Water and its Interaction with Porous Inorganic Building Materials*. Hydrophobe V. 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials. Aedificatio Publishers, pp 57-74.
- [2]https://sigarra.up.pt/feup/pt/conteudos_geral.ver?pct_pag_id=249640&pct_parametros=pv_ocorren cia_id=276965&pct_grupo=33961#33961
- [3] Freitas, V. *Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos*. Editora OERN.2012
- [4] Guimarães, Ana S. M. G. *Caracterização experimental do funcionamento de sistemas de ventilação da base das paredes para tratamento da humidade ascensional*. Porto, FEUP.2007
- [5] Couto, Sandra C. C. Utilização de hidrófugos de superfície em materiais cerâmicos. Influência na secagem. Lisboa, ISEL.2010
- [6] TORRES, M. I. M. *Humidade Ascensional em Paredes de Construções Históricas*. Tese de Doutoramento. Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – FCTUC, 2004.
- [7] <http://www.engenhariacivil.com/dicionario/higroscopicidade>, 2013
- [8] Freitas, V. (1992). *Transferência de humidade em paredes de edifícios - análise do fenómeno de interface*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto
- [9] Slalina, Petr. *Moisture transport in compact flat roofs*. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia Civil Praga, 2009.
- [10] Azevedo, Simão C.A. *Influência do teor de água no comportamento de materiais de construção*. Tese de mestrado, Faculdade de ciências e tecnologias de Lisboa, 2011.
- [11] Freitas. V, Torres. M, Guimarães. A. *Humidade ascensional*. FEUP Edições.2008
- [12] Ferreira, João M. L. C., *Degradação da pedra provocada por sais em edifícios antigos*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,2012.
- [13] Freitas. V, Pinto. P. *permeabilidade ao vapor de materiais de construção- condensações internas*, Nota de Informação Técnica- NIT.002- LFC 1998, 2ªedição.
- [14] Brito, Vânia P. S. *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*, Tese de Mestrado, Lisboa, Faculdade de ciências e tecnologias de Lisboa, 2008

- [15] TORRES, M. I. M.; FREITAS, Vasco P. *Rising damp in historical buildings. Research in Building Physics. 2nd International Conference on Building Physics*, Leuven, Belgica, pp. 369-375, 14/18 de Setembro, 2003.
- [16] Magalhães. A, Veiga.M. *Estudo comparativo de possíveis soluções de argamassas para revestimentos de paredes de edifícios antigos*, LNEC
- [17] fabiola Rago beltrame e kai Loh- *Aplicação de selantes em juntas de movimentação de fachadas*
- [18] Magalhães. D, *INSPECÇÃO, DIAGNÓSTICO E CONTROLE DA ASCENSÃO CAPILAR DE ÁGUAS DOTERRENO PELAS ALVENARIAS: APLICAÇÃO NA IGREJA DE CIDADELHE*, Tese de Mestrado, UTAD, 2008
- [19] H. Janssen, H. Derluyn , J. Carmeliet, *Moisture transfer through mortar joints: A sharp-front analysis*, Cement and Concrete Research 42, 2012
- [20] freitas.V, Abrantes. V, Crausse. P, *Moisture Migration in Building Walls-Analysis of the Interface Phenomena*, Building and Environment, Vol. 31, No. 2, pp. 9S108, 1996
- [21] TORRES, M. I. M.; FREITAS, Vasco P. *Wall Base Ventilation for Rising Damp Control in Historical Buildings: Research and Practice*. 10th Canadian Conference on Building Science and Technology, pp. 174-183, Ottawa, Canada, 2005.
- [22] Brocken HJP, Spiekman ME, Pel L, Kopinga K, Larbi JA. *Water extraction out of mortar during brick laying: a NMR study*. Mater Struct 1998;31:49–57.
- [23] Wilson. M, Hoff.W, Hall.C. *Water Movement in Porous Building Materials-XIII. Absorption into a Two-Layer Composite MOIRA A.*, Building and Environment, Vol. 30, No 2, pp. 209-219, 1995
- [24] Wilson. M, Hoff.W, Hall.C. *Water Movement in Porous Building Materials-XIV. Absorption into a Two-Layer Composite (SA < SB) MOIRA A.*, Building and Environment, Vol. 30, No. 2, pp. 221-227, 1995
- [25] HOLM, A, H. - *Moisture migration in building elements*, Relatório, FEUP, Julho 1995
- [26] EN 1015-18 ,Methods of test for mortar for masonry - Part 18: *Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, Dezembro 2002
- [27] RILEM TC 25-PEM (1980) - Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, Materials and Structures 13, 197-199 (test No. II.2 “Coefficient of water vapour conductivity”), 204-207 (test No. II.5 “Evaporation curve”), 209 (test No. II.6 “Water absorption coefficient (capillarity)”). Paris, 1980.
- [28] la lutte contre l’humidité dans les façades, Par E.B. GRUNAU
- [29] Sousa, J.M. and V. Peixoto de Freitas, *Caracterização do Coeficiente de Capilaridade e da Permeabilidade Líquida de Materiais de Revestimento de Fachada*, in Encontro 1997, Materiais de Construção - Inovação e qualidade. 1997: ISMAG, Lisboa.
- [30] Deutsche Normen DIN 52617 (1987-05)- *Determination Of The Water Absorption Coefficient Of Construction Materials*
- [31] Ulsamer, Federico. *A humidade na construção civil*. Edições CETOP.1997

7

ANEXOS